



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Electricidad

PROYECTO FIN DE CARRERA

EL ENSAYO DE MEDIDA DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DE TRANSFORMADORES (FRA)

Autor: Alfonso Ruiz Luna

Tutor: Juan Carlos Burgos Díaz

Leganés, mayo de 2011

Título: El ensayo de medida de la respuesta en frecuencia de transformadores (FRA).

Autor: Alfonso Ruiz Luna

Director: Juan Carlos Burgos Díaz

EL TRIBUNAL

Presidente: Miguel Montilla D'Jesús

Vocal: Carlos González García

Secretario: Gloria Hermida Garrote

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 16 de mayo de 2011 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Índice

Capítulo 1	1
1.1. Problemática actual.....	1
1.2. Introducción.....	1
1.3. Estructura del proyecto.....	3
1.4. Objetivos del proyecto.....	4
Capítulo 2 Ensayos de diagnóstico de transformadores	5
2.1. Introducción.....	5
Capítulo 3 Estado del arte	7
3.1. Introducción.....	7
3.2. Propósito de la medida FRA.....	8
3.3. Estandarización de la medida	9
3.4. Circuito equivalente del transformador a alta frecuencia.....	9
3.5. Técnica de medida FRA	11
3.5.1. Ámbito de medida	11
3.5.2. Preparación de la red eléctrica.....	11
3.5.3. Preparación del transformador.....	12
3.5.4. Test de ensayo	13
3.5.5. Cables de ensayo	14
3.5.6. Impedancia de medida	15
3.5.7. Elección de puesta a tierra	16
3.5.8. Ruido	17
3.5.9. Tipos de medida en función de la conexión realizada.....	17
3.5.9.1. Medida de la relación entre la tensión de entrada y la de salida	17
3.5.9.2. Medida de la impedancia de entrada del arrollamiento.....	18
3.5.9.3. Medida de la tensión de transferencia	19
3.5.10. Tipos de medida en función de la onda de tensión aplicada	21
3.5.11. Medidas FRA que se realizan.....	22
3.5.12. Conexión del triángulo de compensación.....	26
3.5.13. Respuesta en frecuencia de un arrollamiento “sano”	26
3.6. Factores influyentes en la medida	27
3.6.1. Longitud del cable de medida.....	27
3.6.2. Impedancia de derivación.....	28
3.6.3. Influencia de las pasatapas	30
3.6.4. Efecto de la conexión del neutro	31
3.6.5. Mal contacto	32
3.6.6. Test de cero decibelios	32
3.7. Tipo de fallos y su reflejo en la huella FRA.....	34
3.7.1. Defectos mecánicos	34
3.7.1.1. Movimiento radial o buckling	35
3.7.1.2. Movimiento axial.....	36
3.7.1.3. Movimiento localizado del devanado de regulación	37
3.7.1.4. Pérdida de la presión de apriete.....	37
3.7.1.5. Presencia de un objeto extraño en la cuba.....	39
3.7.2. Defectos eléctricos.....	40
3.7.2.1. Cortocircuito en la laminación del núcleo	40

3.7.2.2. Cortocircuito en una o más espiras	41
3.7.2.3. Magnetismo residual.....	42
3.7.2.4. Mala puesta a tierra de la cuba	43
3.7.2.5. Núcleo flotante	44
3.7.2.6. Núcleo con múltiples puestas a tierra	45
3.7.3. Defectos de aislamiento.....	45
3.7.3.1. Aislamiento flotante, pérdida de aislamiento entre devanados	46
3.7.3.2. Nivel de aceite	46
3.8. Interpretación de la huella FRA.....	47
3.8.1. Introducción.....	47
3.8.2. Tipos de respuesta de FRA.....	47
3.8.3. Rango de frecuencia de interpretación	49
3.8.4. Metodología de interpretación.....	50
3.8.4.1. Método directo de comparación	50
3.8.4.2. Comparación con histórico del transformador	51
3.8.4.3. Comparación con unidad gemela	52
3.8.4.4. Comparación con otras fases del transformador.....	53
3.8.5. Comparación mediante modelos matemáticos	54
3.8.5.1. Coeficiente de correlación	55
3.8.5.2. Desviación espectral	58
3.8.5.3. Máxima diferencia absoluta (DBAS)	58
3.8.5.4. Comparación de resultados de FRA con otras técnicas de diagnóstico	59
3.8.5.4.1. Ensayo de excitación por fase	59
3.8.5.4.2. Relación de transformación	59
3.8.5.4.3. Impedancia de cortocircuito	60
3.8.5.4.4. Resistencia de arrollamiento.....	60
Capítulo 4 Frecuencia natural.....	61
4.1. Introducción.....	61
4.2. Aspecto general de la traza FRA	61
4.3. Comportamiento en frecuencia de una red RLC	67
4.4. Frecuencia natural.....	69
4.4.1. Conceptos generales	69
4.4.2. Circuito equivalente.....	70
4.4.3. Evaluación numérica	71
4.4.3.1. Parámetro alfa.....	71
4.4.3.2. Inductancia magnetizante	73
4.4.3.3. Frecuencia natural del transformador	73
Capítulo 5 Resumen y conclusiones	81
5.1. Resumen	81
5.2. Conclusiones.....	83
Índice de términos	84
Referencias	85

Índice de Figuras

Figura 3.1. Circuito equivalente del transformador a alta frecuencia [5].

Figura 3.2. Transformador preparado para realizar ensayo FRA.

Figura 3.3. Equipos utilizados en un ensayo FRA [7].

Figura 3.4. Diagrama general de conexión [16].

Figura 3.5. Esquema básico de conexión [13].

Figura 3.6. Esquema de conexión de la medida entre la tensión de entrada y de salida [23].

Figura 3.7. Esquema de conexión de la impedancia de entrada del arrollamiento [23].

Figura 3.8. Esquema de conexión de la medida de tensión de transferencia [23].

Figura 3.9. Deformaciones más habituales en el arrollamiento del transformador [23].

Figura 3.10. Diferencias entre traza SFRA e IFRA.

Figura 3.11. Respuesta de admitancia propia de circuito abierto [20].

Figura 3.12. Comparación entre admitancia de circuito abierto y de cortocircuito [20].

Figura 3.13. Capacidad entre arrollamientos [20].

Figura 3.14. Admitancia de transferencia [20].

Figura 3.15. Comparación entre medida de admitancia (naranja) y de capacidad entre devanados (azul).

Figura 3.16. Respuesta en frecuencia de un transformador de tres arrollamientos trifásico, correspondiente al arrollamiento de AT (130 kV) .

Figura 3.17. Influencia de la longitud de los cables en el ensayo FRA [4].

Figura 3.18. Influencia de la resistencia de los cables [4].

Figura 3.19. Efecto de las pasatapas en el ensayo FRA [4].

Figura 3.20. Influencia de la conexión del neutro [4].

Figura 3.21. Ensayo FRA con un mal contacto [15].

Figura 3.22. Esquema de conexión de cero decibelios [20].

Figura 3.23. Respuesta en frecuencia ante ensayo de cero decibelios [20].

Figura 3.24. Arrollamiento con movimiento radial [17].

Figura 3.25. Respuesta en frecuencia de un devanado con movimiento radial [20].

Figura 3.26. Respuesta en frecuencia para un devanado con movimiento axial [12].

Figura 3.27. Respuesta en frecuencia para un movimiento localizado del devanado de regulación de la fase A (roja) [20].

Figura 3.28. Pérdida de la presión de apriete. [7]

Figura 3.29. Respuesta en frecuencia para pérdida de la presión de apriete [11].

Figura 3.30. Huella FRA para un desplazamiento de 2 mm [11].

Figura 3.31. Respuesta en frecuencia para objeto extraño en la cuba [15].

- Figura 3.32. Respuesta en frecuencia para cortocircuito en el núcleo [20].
- Figura 3.33. Respuesta en frecuencia para cortocircuito en espira [20].
- Figura 3.34. Respuesta en frecuencia con arrollamiento con espiras adicionales [15].
- Figura 3.35. Comparación de transformador con magnetismo residual [20].
- Figura 3.36. Respuesta FRA con mala puesta a tierra de la cuba [15].
- Figura 3.37. Respuesta en frecuencia para transformador con núcleo flotante [8].
- Figura 3.38. Respuesta en frecuencia para transformador con múltiples puestas a tierra [15].
- Figura 3.39. Respuesta en frecuencia para un transformador con pérdida de aislamiento [20].
- Figura 3.40. Respuesta en frecuencia para transformador con aceite (rojo) y sin aceite (azul) [20].
- Figura 3.41. Diferentes escalas para trazas FRA [20].
- Figura 3.42. Rango de frecuencia de interpretación de ensayo FRA [20].
- Figura 3.43. Comparación de huella FRA con ensayo histórico [20].
- Figura 3.44. Comparación de huella FRA de varias unidades gemelas [20].
- Figura 3.45. Comparación traza FRA entre fases [20].
- Figura 4.1. Circuito equivalente del transformador a alta frecuencia [28].
- Figura 4.2. Circuito equivalente reducido del transformador a alta frecuencia [28].
- Figura 4.3. Capacidad derivación despreciable [28].
- Figura 4.4. Capacidad derivación despreciable frente a capacidad serie [28].
- Figura 4.5. Capacidad serie despreciable [28].
- Figura 4.6. Traza FRA para capacidad serie despreciable [28].
- Figura 4.7. Comportamiento de la respuesta FRA [28].
- Figura 4.8. Circuito equivalente de diez elementos de una bobina de un devanado [27].
- Figura 4.9. Circuito general para N elementos [27].
- Figura 4.10. Factor α en función de la tensión nominal del transformador [22].
- Figura 4.11. Respuesta en frecuencia de reactancia inductiva (rosa) y capacitiva (azul) [34].
- Figura 4.12. Traza FRA de una bobina ideal [34].
- Figura 4.13. Traza FRA de una impedancia capacitiva ideal [34].
- Figura 4.14. Huella FRA de un devanado [34].

Índice de Tablas

Tabla 3.1. Límite de variación normal para los métodos de comparación de la huella FRA [13].

Tabla 3.2. Codificación de parámetros [13].

Tabla 4.1. Correlación entre cambios de parámetros del transformador y tipo de falta [26].

Tabla 5.1. Detectabilidad de faltas [33].

Capítulo 1

1.1. Problemática actual

El ensayo FRA es la principal técnica de diagnóstico de movimiento de arrollamiento de transformadores, la cual está ampliamente extendida en el campo del mantenimiento de transformadores.

Sin embargo, es una técnica que todavía no se encuentra incluida dentro del protocolo habitual, en diversas empresas, del mantenimiento de transformadores, debido principalmente a dos razones, ambas relacionadas con el diagnóstico de medida:

- Resulta complicado relacionar la medida obtenida del ensayo de respuesta en frecuencia (FRA) y la realidad física interna del transformador.
- Es difícil cuantificar la medida de la respuesta en frecuencia, ya que para ello se precisaría de modelos matemáticos muy complejos.

1.2. Introducción

Actualmente, con la liberación del mercado eléctrico, reducir costes es primordial para poder ofrecer energía a un precio competitivo. En este sentido, los elementos en los cuales se pueden conseguir un mayor ahorro son, típicamente, en los de mayor coste.

El transformador de potencia se encuentra entre las máquinas eléctricas más importantes y caras de todas las existentes en el sistema eléctrico. El transformador de potencia es el elemento que delimita la frontera entre generación, transporte y distribución.

Su diseño tiene un ciclo de vida de unos 30 años. Esto no implica que no se pueda continuar explotando más allá de este tiempo. Para ello es necesario conocer el estado y evolución del transformador en el tiempo con el fin para de poder operarlo con seguridad y determinar si es apropiado continuar su uso [30].

La modificación de directrices en muchas empresas ha ejercido una considerable influencia en el ámbito de operación y mantenimiento de sus máquinas eléctricas. Estas empresas han reducido, en algunos casos, los trabajos de mantenimiento consiguiendo, por lo tanto, reducir costes a corto plazo, y generando consecuentemente un mayor riesgo a medio y largo plazo [30].

La condición de explotación de las máquinas eléctricas también han cambiado, en el sentido de obtener el máximo rendimiento de cada una de ellas, funcionando al máximo régimen posible de operación. Este marco de trabajo tiende a envejecer prematuramente el parque de máquinas, por lo que es imprescindible realizar un programa de mantenimiento para detectar situaciones de riesgo que evite a medio plazo un irregular campo de maniobra [30].

Los transformadores son capaces de soportar pequeños cortocircuitos sin llegar a provocar un fallo, sin embargo, al producirse una deformación, la probabilidad de continuar en servicio disminuye al aumentar el estrés eléctrico entre espiras. Además este fenómeno provoca un envejecimiento prematuro del aislamiento. No obstante, pueden ocasionarse otro tipo de faltas con consecuencias más graves, como la reparación o sustitución de la máquina, con la consecuente interrupción del suministro eléctrico.

1.3. Estructura del proyecto.

El proyecto está dividido en 5 capítulos, en los cuales se abordarán los temas a tratar.

En el capítulo 2 se definirán los tipos de ensayo, dentro del mantenimiento existente en el mundo de los transformadores.

En el capítulo 3, se describirá el estado del arte de la técnica de medida de la respuesta en frecuencia de transformadores (FRA) para este proyecto. Se procederá a describir los equipos utilizados, los métodos de ensayo de los cuales se dispone, así como su procedimiento. Por último, se describirán los tipos de faltas que detecta este tipo de ensayo.

El capítulo 4 prestará especial hincapié en el primer pico de resonancia del transformador, también conocido como frecuencia natural, que se procederá a describir matemáticamente.

El capítulo 5 consta del resumen y conclusiones del proyecto.

1.4. Objetivos del proyecto

El primer objetivo de este PFC, consiste en realizar una revisión bibliográfica sobre la técnica FRA, para determinar los diferentes tipos de defectos que pueden encontrarse en un transformador y determinar su influencia en la huella FRA.

Dentro de los cuatro tipos de medida FRA, el más utilizado es el principio-final, por lo que en este tipo de ensayo resulta crucial determinar el valor del primer pico de resonancia, también conocido como frecuencia natural. Se intentará determinar los parámetros físicos del transformador asociados a este término, y por qué resulta tan importante para este tipo de ensayo.

Capítulo 2 Ensayos de diagnóstico de transformadores

2.1. Introducción

Los transformadores son uno de los elementos más costosos de una red eléctrica. Un fallo en un transformador puede ocasionar cuantiosas pérdidas económicas, de valor incluso mayor que el del propio transformador (caso en que el fallo del transformador origine un incendio) o acarrear multas millonarias por parte de las comunidades autónomas. Por todo lo anterior, es de gran importancia conocer el estado de un transformador para evitar fallos intempestivos. En este sentido, se realizan periódicamente ensayos de diagnóstico.

Los principales ensayos de diagnóstico son:

- Medida de la capacidad y tangente de delta entre arrollamientos.
- Medida de la capacidad y tangente de delta de las pasatapas.
- Ensayo de vacío.
- Medida de la relación de transformación.
- Ensayo de determinación de humedad en el aislamiento (FDS, PDC o RVM).
- Medida de la resistencia del arrollamiento.
- Ensayo de medida de la resistencia del cambiador de tomas.
- Medida del aislamiento.
- Impedancia de cortocircuito.
- Ensayos físico-químicos del aceite.
- Determinación de los gases disueltos en el transformador (DGA).
- Medida de compuestos furánicos.
- Ensayo de medida de la respuesta en frecuencia (FRA).

Capítulo 3 Estado del arte

3.1. Introducción

Una de las averías más difíciles de detectar en un transformador es el movimiento o deformación de los arrollamientos. Este tipo de problemas se debe principalmente a cortocircuitos o pérdidas de apriete de sujeción. Estos acontecimientos pueden derivar en faltas del transformador e incluso explosión [4].

El método FRA es el ensayo más efectivo a la hora de detectar movimientos de arrollamiento. Sin embargo, dicha técnica es muy difícil de interpretar, a menos que el devanado esté muy dañado, y muchas veces la interpretación se basa en el conocimiento y la experiencia de ingenieros que lleven a cabo el ensayo [3]. Esta técnica es ampliamente utilizada ya que tiene una alta sensibilidad, y está basada en el concepto de que un cambio en el arrollamiento, debido a una deformación o desplazamiento, provoca un cambio en las capacidades e inductancias del transformador, y consecuentemente una modificación en su respuesta en frecuencia [18].

En este capítulo se abordará el ensayo FRA, se describirá el esquema de conexiones del ensayo, así como los tipos de ensayo en función de la respuesta y del tipo de inyección. Se tratará la sensibilidad del ensayo en función de diversos acontecimientos que afectan a la medida, además se propondrán diversos ejemplos de faltas que detecta este tipo de ensayos.

Las primeras investigaciones acerca del método FRA o TF (función de transferencia) utilizaban la respuesta en el dominio del tiempo, analizando la respuesta ante un impulso de tensión en escalón que se aplicaba a la entrada del arrollamiento.

3.2. Propósito de la medida FRA

La medida FRA ha demostrado ser la mejor herramienta para evaluar la condición mecánica del transformador, es decir, en la detección de movimientos de arrollamientos, pérdidas de sujeción de apriete y movimientos de discos o espiras [7].

El interés principal de la técnica FRA en transformadores de potencia, es detectar las deformaciones de los arrollamientos causadas por fuerzas electromagnéticas debidas a sobrecorrientes ocurridas durante una falta, ya sea un error de sincronización del transformador a la red o un cortocircuito.

El ensayo FRA también detecta otro tipo de faltas tales como malas puestas a tierra del núcleo, o núcleo flotante, u otros problemas que pueden ocasionar cambios en la distribución de la capacidad e inductancia del transformador [20].

Otro tipo de aplicaciones de la medida FRA es cuantificar el estado del transformador después de un traslado, y verificar que no ha habido movimientos tanto del núcleo como de los arrollamientos, al ubicar al transformador en su posición de la subestación [20].

Además del propósito principal de la medida FRA, que es la de evaluar el estado mecánico del transformador, diversos autores establecen que es posible evaluar el estado del aislamiento de los arrollamientos (contenido en humedad) y del aislamiento a tierra [5].

3.3. Estandarización de la medida

La medida FRA debe ser repetible y reproducible, ya que es una medida muy sensible, la cual se ve afectada mucho ante cualquier mínimo cambio. El primer ensayo realizado al transformador debe ser en fábrica, si no una vez esté emplazado el transformador en la posición de la subestación, lo cual constituirá una medida base. Una buena medida base o histórica puede ser fundamental a la hora de realizar un diagnóstico fiable y preciso. Para ello, se deberán tener en cuenta diversos aspectos a la hora de realizar el ensayo y en los siguientes realizarlo de forma idéntica [16].

3.4. Circuito equivalente del transformador a alta frecuencia

En baja frecuencia, el circuito equivalente de un transformador está formado por resistencias (que tienen en cuenta la resistencia de los arrollamientos y las pérdidas en el hierro) e inductancias (que tienen en cuenta el flujo común y el flujo disperso). Sin embargo, en alta frecuencia es indispensable tener en cuenta las capacidades, por pequeñas que éstas sean, ya que la corriente que circula por las capacidades

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (6)$$

Siendo:

i : corriente circulante por un condensador (A)

C : capacidad del condensador (F)

du : variación de tensión (V)

dt : diferencial de tiempo (s)

puede ser mayor que la que circula por las reactancias.

Capacidades parásitas existen siempre que se tienen dos elementos metálicos a diferente potencial. En un transformador cabe distinguir las siguientes capacidades :

- Capacidades entre arrollamientos y tierra.
- Capacidades entre un arrollamiento y el otro (o los otros, si hay más de dos).
- Capacidades entre espiras de un arrollamiento.

Para estudiar el transformador a alta frecuencia, no es posible utilizar un circuito de parámetros concentrados y hay que utilizar un circuito de parámetros distribuidos, como el que se muestra en la figura 3.1, ya que las capacidades a tierra suponen caminos de baja impedancia para la corriente [5].

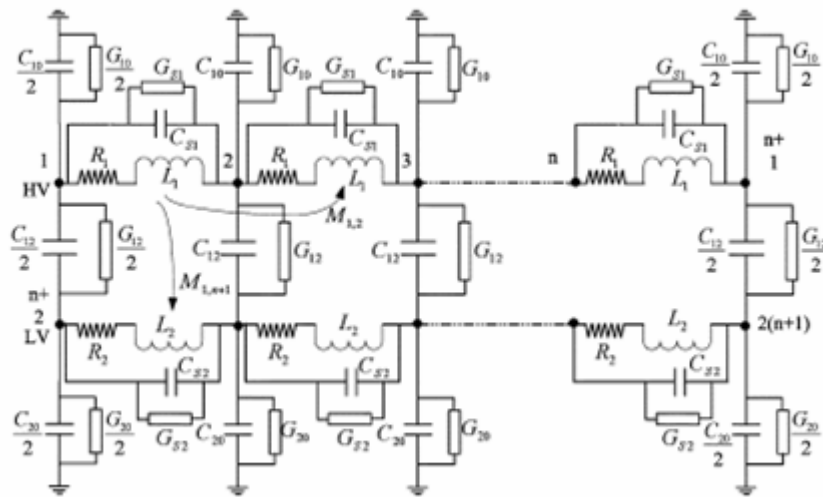


Figura 3.1. Circuito equivalente del transformador a alta frecuencia [5].

3.5. Técnica de medida FRA

3.5.1. Ámbito de medida

Los escenarios más típicos en los cuales se realiza la medida FRA en un transformador son los siguientes:

- Instalación o reubicación del transformador.
- Después de una falta grave.
- Ensayo de mantenimiento.
- Después de una alarma del transformador (por relé diferencial, Bucholz, etc.).
- Después de un aumento de gases en la DGA.
- Después de un cambio en el ensayo de capacidad durante un ensayo rutinario.
- Modelización del transformador.

3.5.2. Preparación de la red eléctrica

Si el transformador a ensayar estuviera en condiciones de explotación, para realizar el ensayo debe ser aislado de la red [16].

Además se debe conectar a tierra mediante puestas a tierra de los seccionadores o interruptores de la posición del transformador. La cuba del transformador también debe tener una puesta a tierra.

3.5.3. Preparación del transformador

Se deben desconectar todas las conexiones externas de las pasatapas a la red [16]. Esto incluye el neutro y la conexión a tierra de los devanados de compensación. Generalmente, el devanado de compensación, típicamente un triángulo, se debe dejar cerrado, para que haya repetibilidad en las medidas.

Cuando sea posible, se conectan directamente los cables de ensayo a las pasatapas (terminales) del transformador, ya que cualquier cable extra que se añada a la medida puede influir en el resultado [16].

A menos que no sea posible quitar el embarrado, éste debe ser lo mas corto posible para evitar la influencia en la medida. En dicho caso, en las siguientes medidas se realizará con idéntico patrón para evitar una predicción ambigua del resultado [16].

En caso de tener un transformador con regulación, se debe tener en cuenta la posición en la que se realiza el ensayo, típicamente se realiza en la posición en la cual el transformador trabaja en régimen de explotación [16]. Como protocolo, el ensayo se efectúa en las posiciones extremas para poder incluir todo el devanado de regulación en la medida [16].

Además, es necesario conocer el nivel de aceite del transformador para posteriores medidas.

En la siguiente figura se muestra un transformador preparado para realizar un ensayo FRA:



Figura 3.2. Transformador preparado para realizar ensayo FRA.

3.5.4. Test de ensayo

El ensayo FRA debe tener un potencial de referencia, el cual debe ser el mismo punto tanto para los equipos involucrados en el ensayo como el transformador bajo prueba. Generalmente, la parte superior de la cuba suele ser el potencial de referencia para el ensayo. La elección de la tierra es un elemento clave en la medida que puede ocasionar efectos muy significativos en el resultado. Las técnicas de puesta a tierra, incluyendo la selección de los conductores de tierra deben ser precisos, repetibles y documentados [16].

En la siguiente figura se presentan los equipos a utilizar:

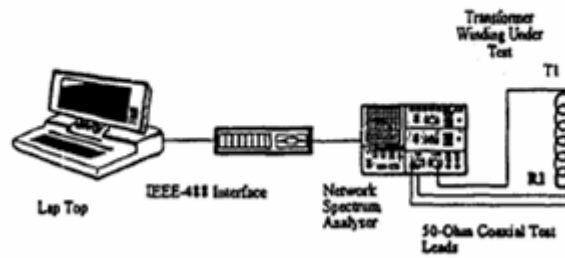


Figura 3.3. Equipos utilizados en un ensayo FRA [7].

Los equipos de medida requieren de una interfaz IEEE 488 y un puerto RS232 [7]. Un analizador de red para generar una señal (típicamente 2 V eficaces) en un barrido de frecuencias determinado (10 Hz-10 MHz), como el HP 8751 A [12], y un cable coaxial de impedancia típica de 50 Ω [7]. El equipo a utilizar debe estar calibrado según norma.

3.5.5. Cables de ensayo

La medida se realiza mediante tres cables:

- Fuente de alimentación (denotado en la figura 3.4 como “Source Lead”).
- El cable de potencial de referencia (denotado en la figura 3.4 como “Reference lead”).
- Cable de medida del espécimen bajo prueba (denotado en la figura 3.4 como “Measure lead”) [16].

El circuito de medida se muestra en la siguiente figura:

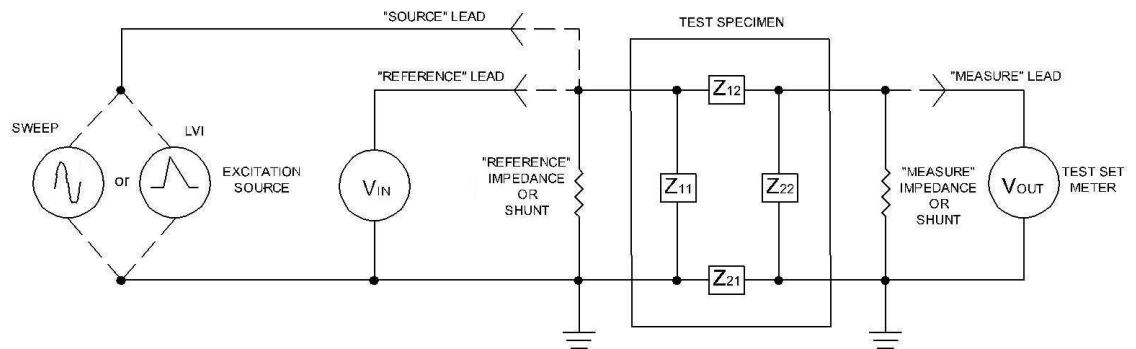


Figura 3.4. Diagrama general de conexión [16].

3.5.6. Impedancia de medida

Una onda de alta frecuencia se comporta como una onda viajera; en los puntos de la red en los que exista una discontinuidad en la impedancia se tiene una reflexión de onda y una refracción. Para evitar reflexiones de onda en el transformador debidas a la diferencia entre la impedancia de éste y del cable se cierra el circuito de medida con una resistencia de un valor óhmico (Z_s) idéntico al del cable utilizado, como se muestra en la figura 3.5.

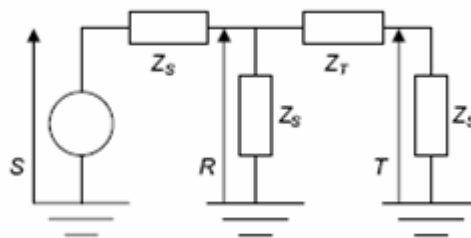


Figura 3.5. Esquema básico de conexión [13].

Z_T : impedancia del arrollamiento a ensayar.

Z_S : impedancia de los cables de medida (típicamente 50 Ω).

Los datos se presentan gráficamente, en forma de módulo y argumento frente a frecuencia. El módulo se conoce como amplitud o ganancia y se define como:

$$K = \log \frac{T}{R} \quad (7)$$

La fase o argumento es:

$$\Phi = \arg(T/R) \quad (8)$$

Siendo [13]:

K : amplitud o ganancia (dB)

T : señal medida (V)

R : señal de referencia (V)

Φ : ángulo de desfase entre la señal medida y la de referencia (rad)

De la figura 3.5 y de (7), se deduce que la impedancia de la señal de referencia es la suma de la impedancia de los cables y de la impedancia del arrollamiento.

3.5.7. Elección de puesta a tierra

El ensayo FRA utiliza la tierra como potencial de referencia, el cual debe ser el mismo punto eléctrico tanto para los equipos de medida, la pantalla de los cables, como la puesta a tierra del transformador.

3.5.8. Ruido

Son pequeñas perturbaciones que se superponen a la señal, y tienden a ocultar la información de la huella FRA. Éste hay veces que no se puede predecir. Puede ser introducido en la señal debido a varios conceptos:

- Generado por el instrumento de medida y acoplado directamente.
- Interferencias electrostáticas y campos electromagnéticos.
- Características de los cables de conexión debido a un mal contacto [16].

3.5.9. Tipos de medida en función de la conexión realizada

Para realizar la medida FRA caben diferentes posibilidades [23], a continuación se exponen las principales.

3.5.9.1. Medida de la relación entre la tensión de entrada y la de salida

Para realizar este método se completa el circuito con una resistencia de idéntico valor que la del cable de medida (figura 3.6). En este método, el diagnóstico está basado en la medida de las tensiones a la entrada y a la salida del transformador (V_1 y V_2 en la figura 3.6) en un rango de frecuencias que comprende desde 1 kHz hasta 10 MHz [23].

$$FRA_{ee} = \left| \frac{V_2(f)}{V_1(f)} \right| \quad (9)$$

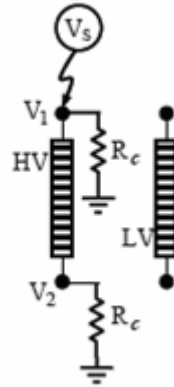


Figura 3.6. Esquema de conexión de la medida entre la tensión de entrada y de salida [23].

3.5.9.2. Medida de la impedancia de entrada del arrollamiento

En este método se mide la tensión aplicada al arrollamiento y la intensidad consumida. Para la medida de la intensidad se utiliza una resistencia de bajo valor óhmico, como se muestra en la figura 3.7. Cabe distinguir dos variantes, según se disponga a tierra el final del arrollamiento a ensayar o no [23].

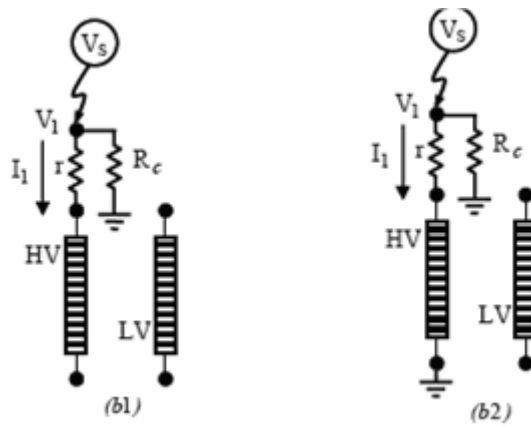


Figura 3.7. Esquema de conexión de la impedancia de entrada del arrollamiento [23].

$$FRA_{\#} = \left| \frac{I_1(f)}{V_1(f)} \right| \quad (10)$$

3.5.9.3. Medida de la tensión de transferencia

Este método se basa en la medida de las tensiones en cada uno de los arrollamientos [23], como se muestra en la figura 3.8.

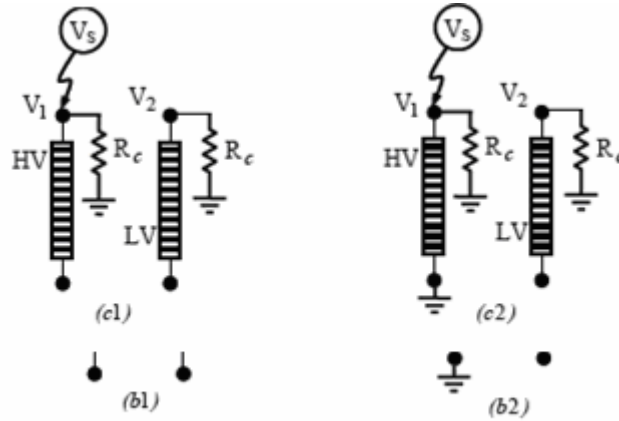
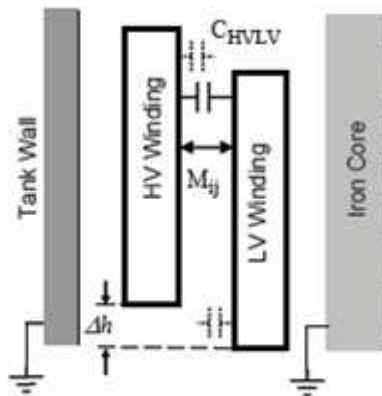


Figura 3.8. Esquema de conexión de la medida de tensión de transferencia [23].

$$FRA_{EE} = \left| \frac{V_2(f)}{V_1(f)} \right| \quad (11)$$

En un transformador pueden darse varios tipos de movimientos, los más usuales se muestran a continuación.



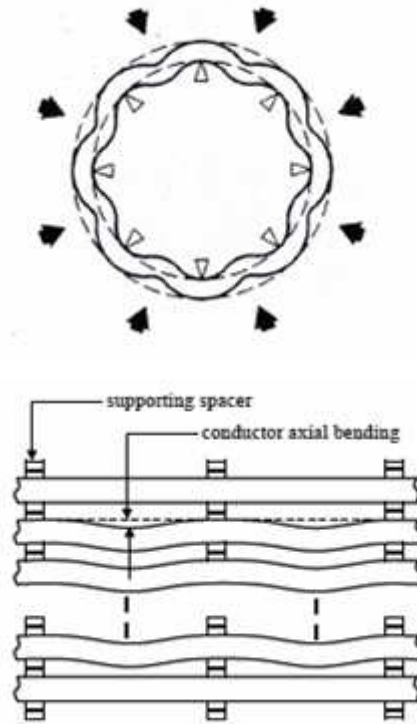


Figura 3.9. Deformaciones más habituales en el arrollamiento del transformador [23].

En [23], se realiza una comparación de los tres métodos descritos, y se muestra que el de la medida de la relación entre la tensión de entrada y la de salida (el primero de los métodos citados) es el más sensible a la hora de detectar deformaciones que otros métodos de diagnóstico son incapaces de detectar (principalmente el “bending axial” o deformación axial de los discos del arrollamiento). Por esta razón, ésta es la forma de conexión utilizada habitualmente.

3.5.10. Tipos de medida en función de la onda de tensión aplicada

La respuesta en frecuencia del transformador tiene la ventaja que es independiente de la forma del impulso de entrada [20]. Hay dos métodos utilizados comúnmente bajo el nombre de FRA, el método de barrido en frecuencia (SFRA) y el de impulso (IFRA). El primero aplica en un terminal del transformador una tensión sinusoidal (típicamente 2 V), cuya frecuencia varía en el tiempo y se recoge la información en el otro. La traza FRA se obtiene dividiendo la salida entre la entrada para cada frecuencia [4].

El método IFRA aplica un impulso de tensión en un terminal del transformador y se recoge la tensión que aparece por el otro [4]. La onda aplicada en este caso es una onda en escalón en el dominio del tiempo. El equipo de medida pasa la onda aplicada y obtenida al dominio de la frecuencia mediante la transformada de Fourier y calcula la amplitud de los componentes de las señales para cada una de las frecuencias. Dividiendo las componentes de idéntica frecuencia de las señales, se obtiene la traza FRA [20]. En la figura 3.10 se muestra la respuesta de un transformador ante IFRA y ante SFRA. Se aprecia que la respuesta es muy semejante excepto para el rango de muy altas frecuencias, ya que en el método IFRA la relación señal-ruido en altas frecuencias es muy pobre [20].

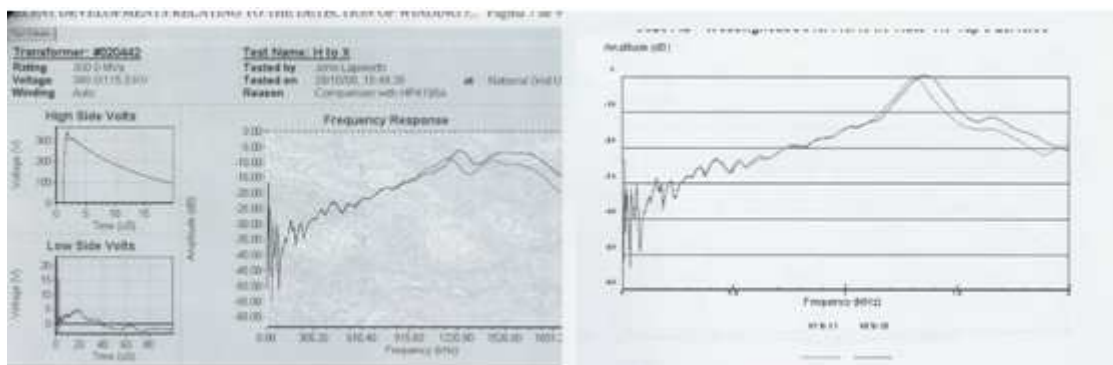


Figura 3.10. Diferencias entre traza SFRA e IFRA.

La medida SFRA, es comúnmente la más utilizada. Las principales ventajas del método SFRA son que tiene un bajo nivel de ruido, mayor repetibilidad y reproducibilidad y requiere menos equipos de medida [18].

3.5.11. Medidas FRA que se realizan

Existen cuatro tipos de conexión detallados a continuación:

Medida a circuito abierto: También denominada como end-to-end. Se inyecta la señal en el final del arrollamiento y se recoge en el principio de éste, con los demás arrollamientos flotantes y abiertos (figura 3.6). Se puede aplicar tanto a transformadores monofásicos o trifásicos.

El principal parámetro que caracteriza la zona de baja frecuencia (por debajo de la primera resonancia) es la impedancia de magnetización, la cual se ve influenciada por el núcleo del transformador [16].

Habitualmente es el más utilizado, ya que es un método simple y permite ensayar cada arrollamiento por separado. En la siguiente figura se presenta dicha medida para un arrollamiento de alta tensión y baja tensión para un transformador de 266 MVA y 420/21/21 kV [20].

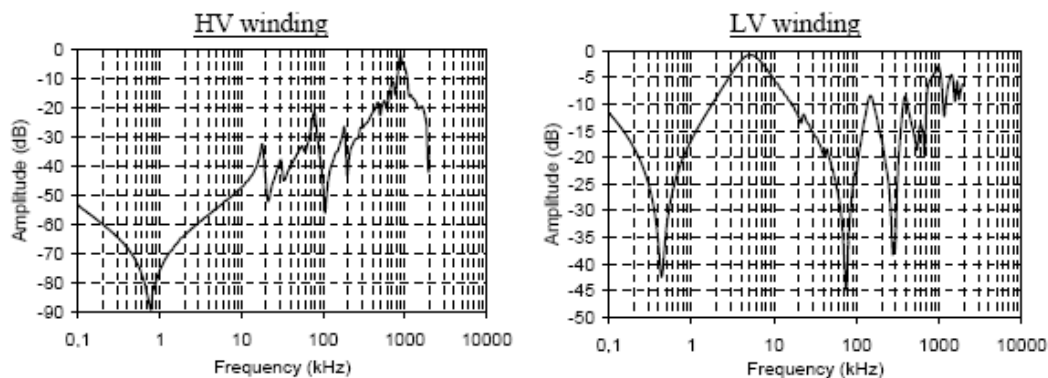


Figura 3.11. Respuesta de admitancia propia de circuito abierto [20].

Puede utilizarse conjuntamente con el ensayo de vacío para determinar una falta en el núcleo del transformador.

Ensayo en cortocircuito: Se realiza de idéntica forma al anterior, pero en este caso con el otro devanado cortocircuitado. Para que la medida pueda ser reproducible, se realizarán sucesivamente de idéntica manera. La conexión de neutro no debe ser cortocircuitada con el resto de las fases [16].

Esta medida aísla la influencia del núcleo por debajo de los 10-20 kHz, ya que la respuesta a baja frecuencia, es decir, la frecuencia natural del transformador, está caracterizada por la impedancia de dispersión en vez de la inductancia de magnetización [20]. La respuesta en altas frecuencias es similar al obtenido en el anterior método, como se puede apreciar en la figura 3.12.

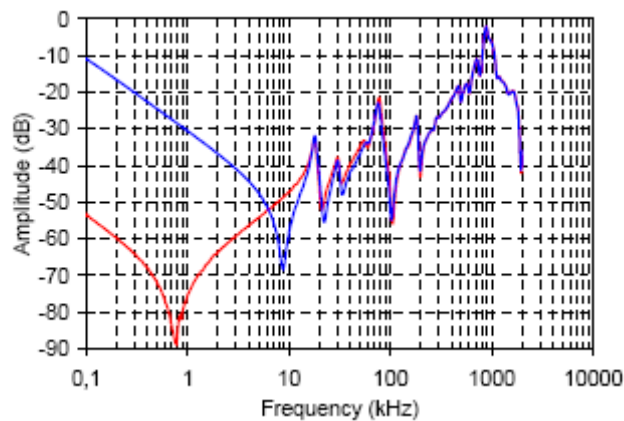


Figura 3.12. Comparación entre admitancia de circuito abierto y de cortocircuito [20].

Esta misma figura también muestra la traza FRA a circuito abierto (rojo) y de cortocircuito (azul). Este tipo de medida produce un diagnóstico similar al de la reactancia de dispersión y la medida de resistencia de arrollamiento [20].

Capacidad entre arrollamientos: Se inyecta la señal en una fase de un arrollamiento y se recoge la respuesta en la fase correspondiente de otro devanado, por ejemplo AT frente a BT (figura 3.8 c1). Por definición, este ensayo no puede realizarse sobre el devanado común de los autotransformadores, ya que se comparte el arrollamiento. La frecuencia natural del transformador está caracterizada por la capacidad entre devanados [20].

Estas medidas muestran una alta impedancia a bajas frecuencias (<100 kHz). La impedancia como norma general disminuye a medida que aumenta la frecuencia [16].

La siguiente figura muestra la respuesta en frecuencia para este tipo de medida:

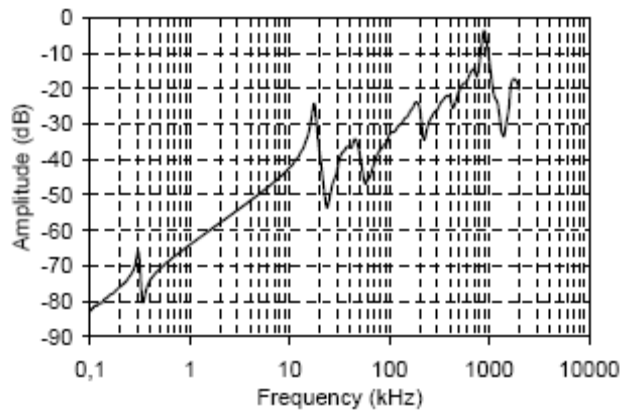


Figura 3.13. Capacidad entre arrollamientos [20].

La figura 3.13 muestra el carácter capacitivo que identifica a la traza FRA en este ensayo.

Admitancia de transferencia: La señal se aplica a una fase de un arrollamiento y se recoge la respuesta en la fase correspondiente de otro arrollamiento, con ambos finales conectados a tierra (figura 3.8 c2) [20].

Todos los terminales que no estén bajo ensayo deben estar flotantes y abiertos. La zona de bajas frecuencias de la traza es constante y viene determinada por la relación de transformación. La figura 3.14 muestra la respuesta de la admitancia de transferencia en un transformador de 266 MVA, 420/21/21 kV [20].

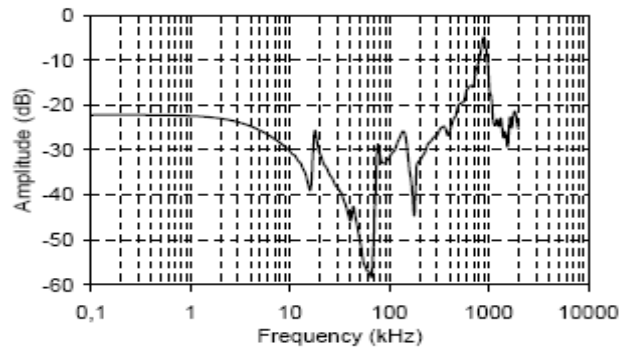


Figura 3.14. Admitancia de transferencia [20].

En la figura 3.15 se comparan ambas trazas para que se puedan observar las diferencias entre ambos métodos de medida.

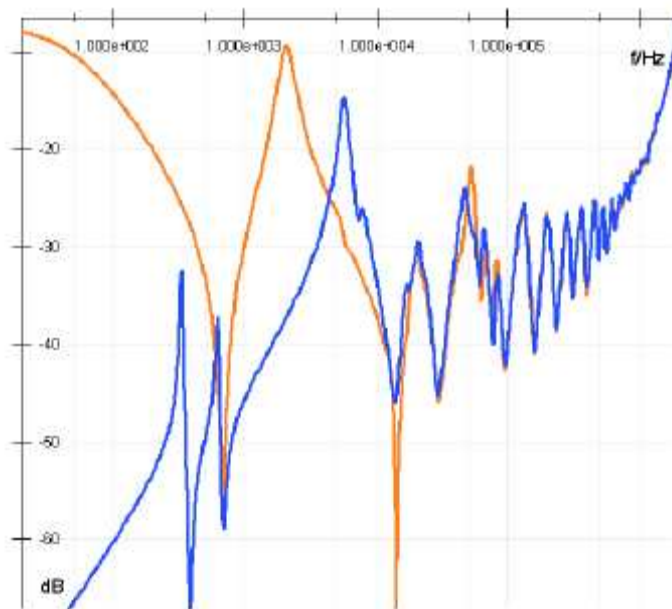


Figura 3.15. Comparación entre medida de admitancia (naranja) y de capacidad entre devanados (azul). Se observa cómo a baja frecuencia predomina el carácter que viene determinado por el tipo de ensayo. A partir del orden de 10 kHz, se observa que predomina el arrollamiento del transformador.

3.5.12. Conexión del triángulo de compensación

El devanado de compensación, típicamente se encuentra cerrado y puesto a tierra. La diferencia entre mantener el triángulo cerrado o abierto debe ser tenido en cuenta para posteriores medidas debido a su influencia en la respuesta a baja frecuencia [20].

3.5.13. Respuesta en frecuencia de un arrollamiento “sano”

Cuando se realiza la medida entre la tensión de entrada y la de salida a circuito abierto, la respuesta a baja frecuencia está caracterizada por un descenso en la amplitud, la cual tiene un pico de resonancia por debajo de 1 kHz, como se aprecia en la figura 3.16. Esta primera frecuencia de resonancia, también llamada frecuencia natural del transformador, está caracterizada por la interacción de la capacidad a tierra del arrollamiento con la inductancia de magnetización. En el caso de las fases extremas se tiene un doble pico de resonancia, debido a que el flujo magnético tiene dos caminos: culata y columna. El primer pico de resonancia puede variar debido a la magnetización residual del transformador [8].

A frecuencias medias hay típicamente un grupo de resonancias, correspondientes a la interacción de la capacidad a tierra y la reactancia de dispersión [8].

A altas frecuencias se observa un grupo confuso de resonancias, correspondiente a las capacidades serie y a tierra y las inductancias de dispersión de partes del arrollamiento.

A muy alta frecuencia, la puesta a tierra de las pantallas y su longitud, pueden tener una gran influencia [8].

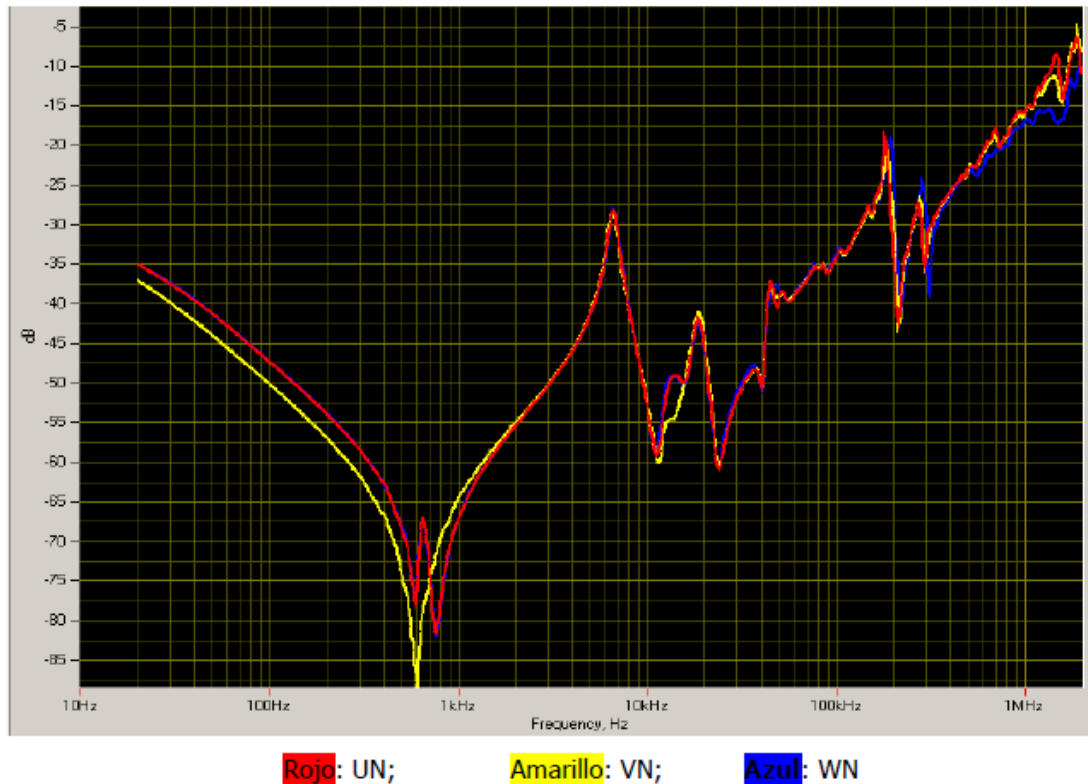


Figura 3.16. Respuesta en frecuencia de un transformador de tres arrollamientos trifásico, correspondiente al arrollamiento de AT (130 kV).

3.6. Factores influyentes en la medida

3.6.1. Longitud del cable de medida

Los cables de medida del ensayo son coaxiales, un conductor y su pantalla, tienen una cierta longitud y por tanto una cierta inductancia. Las pantallas de los cables se conectan a tierra. Esta conexión a tierra se realiza sobre la base de las pasatapas, normalmente a la brida o a cualquier punto de puesta a tierra, como la cuba o un tornillo [2]. Para reducir la inductancia, es recomendable mantener la longitud lo más corta posible. La longitud del cable debe recorrer a lo largo de la pasatapa y conectar a la base de la misma. Este efecto puede apreciarse en la siguiente figura.

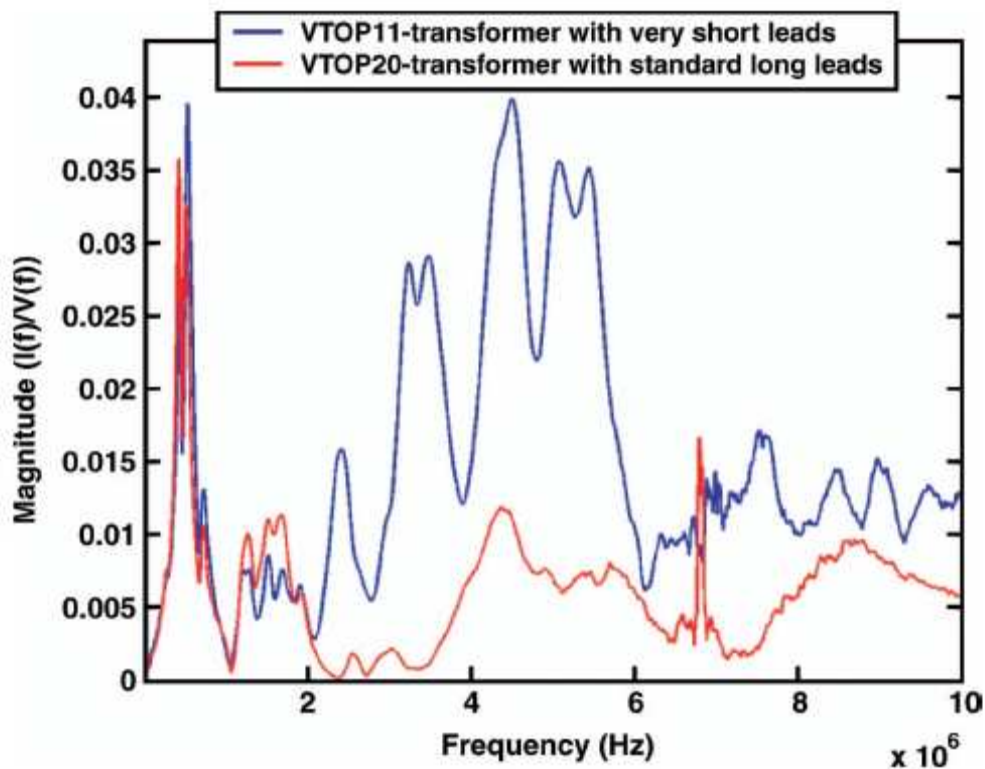


Figura 3.17. Influencia de la longitud de los cables en el ensayo FRA [4].

La traza azul corresponde a unos cables de puesta a tierra cuya longitud es inferior a los de la traza roja.

3.6.2. Impedancia de derivación

Al realizar un ensayo FRA se utiliza una impedancia resistiva para cerrar el circuito de medida. La medida FRA cubre un amplio rango en frecuencias, esto es especialmente importante para la medida de pequeños movimientos de arrollamiento, que normalmente se detectan a muy altas frecuencias ($> 1\text{MHz}$) [4].

A bajas frecuencias (< 1 MHz) la impedancia (típicamente 10 o 50 Ω) no es significativa comparada con la impedancia del transformador. Sin embargo, a altas frecuencias sí que es comparable. Para el método SFRA la impedancia típica es de 50 Ω , la cual es la impedancia de entrada utilizada por el analizador de espectro [3].

Para evaluar la impedancia de derivación en un ensayo FRA en un transformador, se realiza en [4] un estudio con tres valores de resistencia, 50 Ω (denotado en la figura 3.18 con traza verde), 10 Ω (traza roja) y 1 Ω (traza azul). Los dos primeros valores representan los típicos usados para los métodos SFRA e IFRA. La resistencia de 1 Ω se escogió para evaluar el efecto de la resistencia en la sensibilidad de la medida, dicho efecto se muestra en la figura siguiente [4].

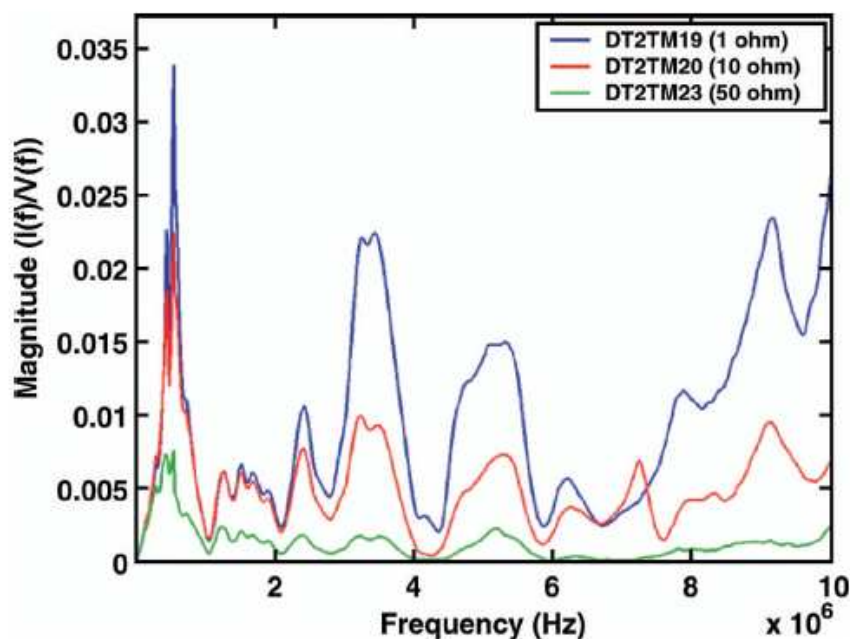


Figura 3.18. Influencia de la resistencia de los cables [4].

Estos resultados muestran el efecto en el rango de frecuencias de 0 a 10 MHz. Según se observa en la figura 3.18, la sensibilidad aumenta, para un pequeño movimiento de arrollamiento, a medida que el valor de la resistencia es menor [4].

3.6.3. Influencia de las pasatapas

La admitancia FRA es muy similar, entre la medida directa del arrollamiento (en el terminal de la pasatapa) y la medida sin la pasatapa en la conexión del bobinado, hasta los 3 MHz. Por encima de esta frecuencia, la medida sin ésta difiere de la medida directa significativamente (figura 3.19) [4].

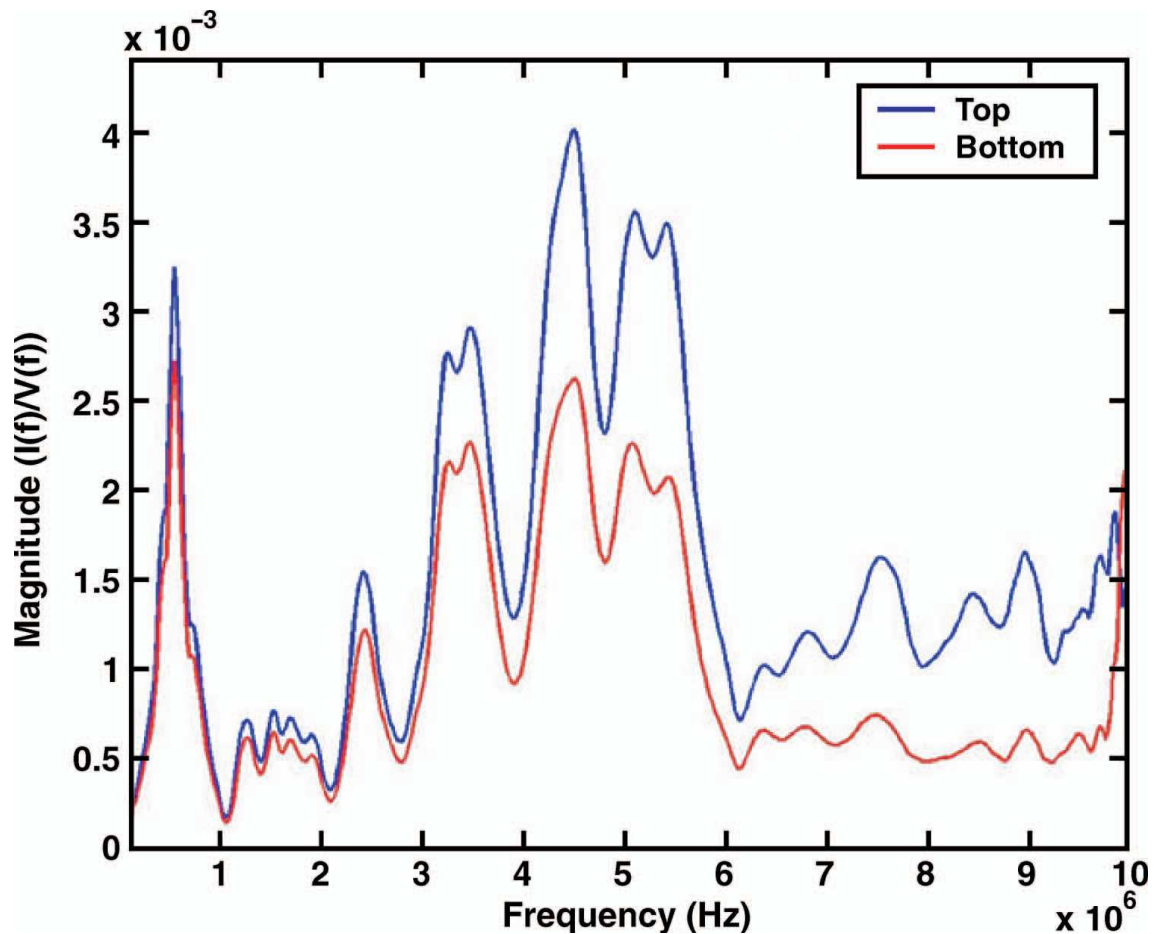


Figura 3.19. Efecto de las pasatapas en el ensayo FRA [4].

La traza azul (con pasatapas) presenta mayor ganancia que la traza roja (sin pasatapas). La forma de ambas trazas es igual.

3.6.4. Efecto de la conexión del neutro

La conexión del neutro (en caso de arrollamiento en estrella) puede afectar a la medida. En [4] se realiza un estudio con dos casos, el primero con el neutro flotante (denotado en la figura 3.20 con traza azul) y el segundo conectado a la cuba del transformador, y por lo tanto a tierra (traza roja). La tensión de entrada se inyecta y se mide en terminales de las pasatapas. La corriente de acoplamiento fue medida con una impedancia de $1\ \Omega$ (se busca una mayor sensibilidad de la medida) [4].

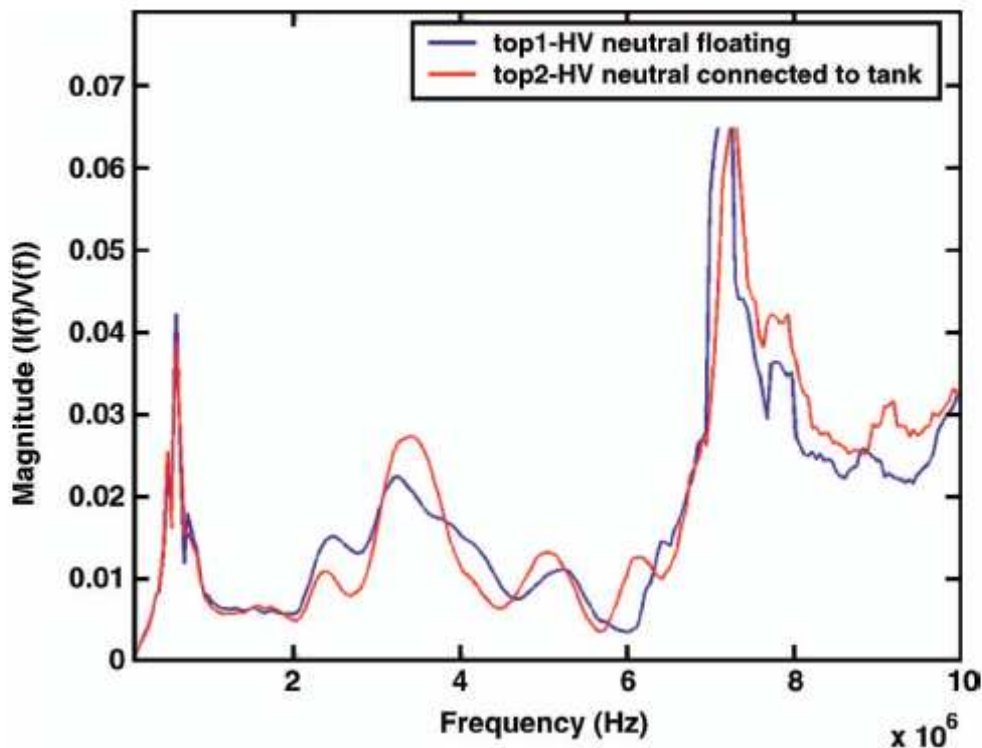


Figura 3.20. Influencia de la conexión del neutro [4].

Estos resultados muestran que la conexión de neutro a tierra tiene un alto impacto sobre el ensayo a altas frecuencias, por debajo de 1.5 MHz se observa que ambas huellas son muy similares. También se deduce, que para poder hacer una comparación con un ensayo histórico con garantías, la medida debe ser realizada en las mismas condiciones para detectar cualquier posible deformación [4].

3.6.5. Mal contacto

Un mal contacto de las pinzas de medida sobre los terminales de las pasatapas, puede provocar un aumento resistivo, y en consecuencia, una variación en la traza. Se presenta una figura en la cual se introducen varias resistencias para simular dicho efecto entre las pinzas de medida y los terminales del transformador [15].

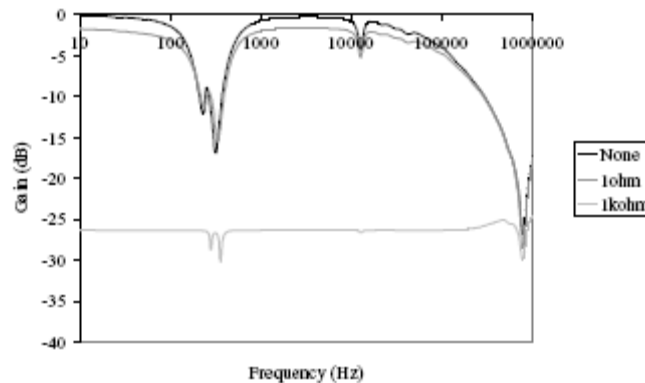


Figura 3.21. Ensayo FRA con un mal contacto [15].

En la figura 3.21 se observa que la respuesta de la resistencia (traza gris oscuro y gris claro) se superpone a la del arrollamiento (traza negra), es decir, a medida que aumenta la resistencia debida a un mal contacto, la ganancia aumenta, y se atenúan los picos de resonancia [15].

3.6.6. Test de cero decibelios

La conexión de cero decibelios se presenta en la siguiente figura:

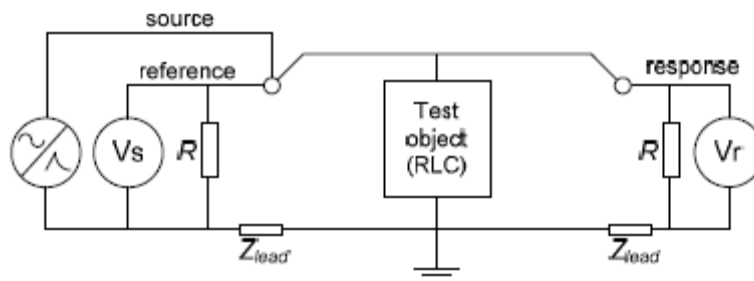


Figura 3.22. Esquema de conexión de cero decibelios [20].

La fuente (indicado en la figura 3.22 como “source”), la referencia (“reference”) y la respuesta (“response”) se conectan a idéntico punto del transformador bajo ensayo. Este test pretende investigar acerca de la influencia de los cables cuando se ensayan transformadores con pasatapas de tamaño considerable. La impedancia Z_{lead} representa la extensión del cable conectado a tierra a la brida de la pasatapa. Esto provoca que el cable quede apantallado y elimine el efecto a alta frecuencia.

En la siguiente figura se muestra la traza FRA para una pasatapa de BT (traza roja) y otra de AT (traza azul).

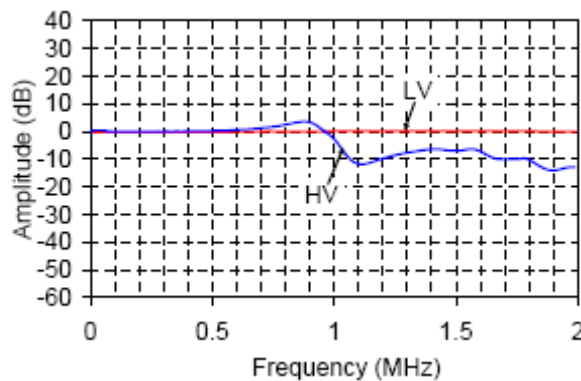


Figura 3.23. Respuesta en frecuencia ante ensayo de cero decibelios [20].

En el caso de la pasatapa de BT, la respuesta es una línea horizontal en cero decibelios, confirmando que los cables no afectarán a la medida; sin embargo en la pasatapa de AT sí que hay una pequeña desviación por encima de 500 kHz, esto implica que la Z_{lead} , es decir, la impedancia del cable, interactúa con la red RLC del transformador [20].

3.7. Tipo de fallos y su reflejo en la huella FRA

Los fallos que habitualmente detecta el ensayo FRA son mecánicos, pequeñas deformaciones, movimiento de arrollamientos, sin embargo éstos también pueden derivar en un fallo eléctrico.

Además de los mecánicos, también es capaz de detectar faltas eléctricas, como cortocircuitos entre espiras, malas puestas a tierra de la cuba, etc.

Diversos autores [5] establecen que además de los usos habituales, la herramienta FRA podría complementar a la medida de capacidad y humedad del transformador, es decir, emplear el ensayo FRA para evaluar el aislamiento interno del transformador, arrollamiento, aceite, etc.

3.7.1. Defectos mecánicos

Cuando un transformador está expuesto a cualquier cortocircuito de la red, provoca un flujo de corriente mucho mayor (típicamente 20 veces) durante el tiempo que dura la falta. Esto provoca fuerzas electromagnéticas radiales internas debidas a esa corriente, y por lo tanto, en esfuerzos mecánicos en los arrollamientos del transformador.

3.7.1.1. Movimiento radial o buckling

Consiste en una deformación radial a lo largo de todo el arrollamiento. Puede apreciarse en la siguiente figura.

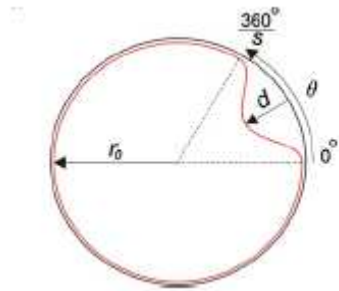


Figura 3.24. Arrollamiento con movimiento radial [17].

Los efectos del buckling consisten básicamente en un cambio geométrico en el arrollamiento. No es típico de sobrecorrientes. Este tipo de deformación radial se debe típicamente a un mal transporte o a una reparación no profesional [17].

Este tipo de defecto resulta en un aumento de la capacidad propia del arrollamiento a tierra y un descenso de la capacidad entre devanados [17]. La respuesta FRA se modifica en el sentido de una disminución de la frecuencia en los picos de resonancia a media y alta frecuencia.

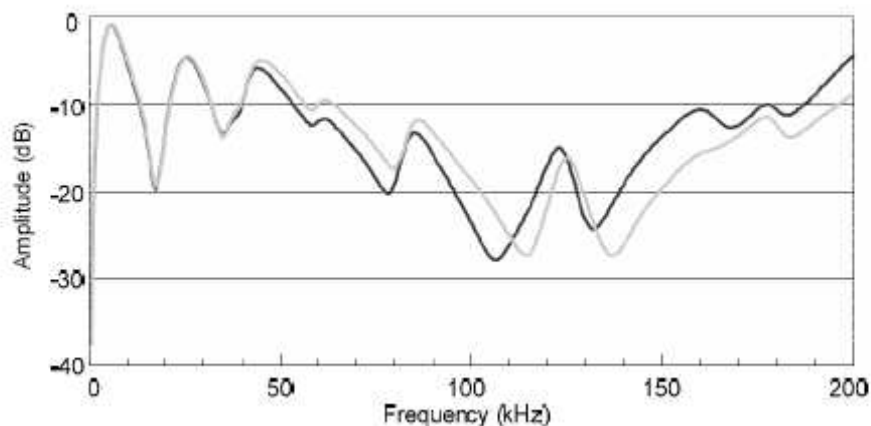


Figura 3.25. Respuesta en frecuencia de un devanado con movimiento radial [20].

En la figura 3.25, la traza negra es la que se encuentra con un defecto provocado por un movimiento radial. Este defecto se localiza en el rango de media frecuencia.

3.7.1.2. Movimiento axial

Consiste en una deformación axial del arrollamiento. La respuesta FRA se caracteriza típicamente en un aumento de la frecuencia de los picos de resonancia de media-alta frecuencia respecto a una fase sana. Además se crean nuevos picos de resonancia a altas frecuencias [12].

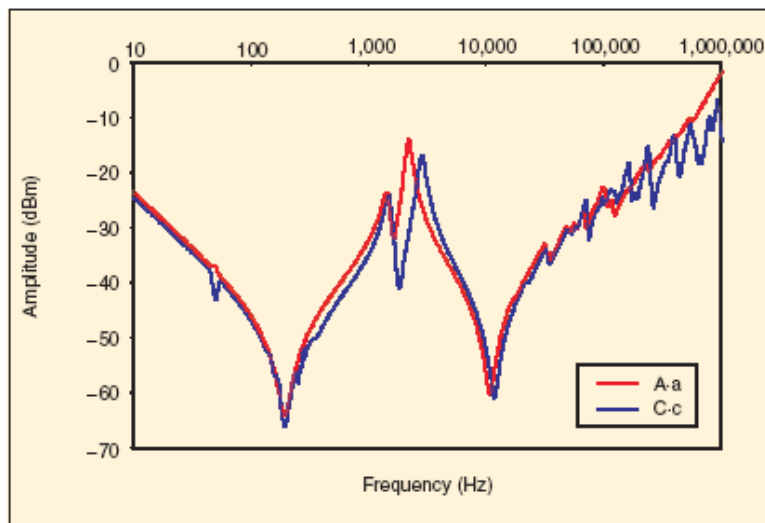


Figura 3.26. Respuesta en frecuencia para un devanado con movimiento axial [12].

Este fenómeno se puede apreciar en la figura 3.26, que muestra la huella FRA de un transformador con una fase con movimiento axial (denotado en la figura con la traza azul) en comparación con la fase sana (traza roja) [12].

3.7.1.3. Movimiento localizado del devanado de regulación

Para el caso de un movimiento en el devanado de regulación, de nuevo puede verse el descenso de frecuencia en los picos de resonancia en el rango de media frecuencia, así como se eliminan resonancias a alta frecuencia [20].

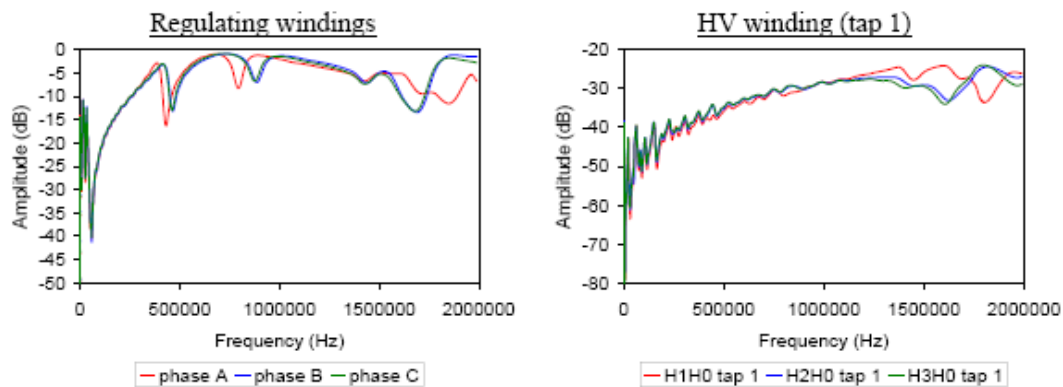


Figura 3.27. Respuesta en frecuencia para un movimiento localizado del devanado de regulación de la fase A (roja) [20].

El fenómeno de esta deformación se observa en la figura 3.27, como creación y eliminación de picos de resonancia a partir de la media frecuencia (indicado con la traza roja en la figura 3.27).

3.7.1.4. Pérdida de la presión de apriete

Este tipo de faltas son muy difíciles de detectar con ensayos del tipo de tangente de delta, reactancia de fuga y corriente de excitación.

La figura 3.28 muestra una fase antes y después de la pérdida de presión de apriete. Hay una reducción en la frecuencia de resonancia de unos 20 kHz en el rango de frecuencia de 100-200 kHz.

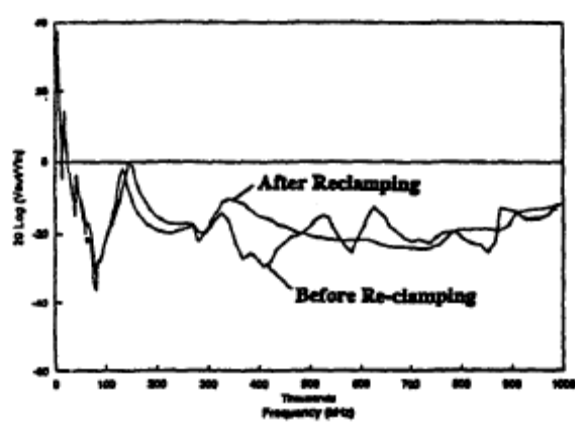


Figura 3.28. Pérdida de la presión de apriete. [7]

Este tipo de fenómeno se puede atribuir al desplazamiento de un arrollamiento [7]. Cuando la frecuencia del arrollamiento se aproxima a la frecuencia de la fuerza de cortocircuito axial, éste entra en resonancia.

La siguiente figura muestra este fenómeno, donde se aprecia un desplazamiento de la traza FRA hacia altas frecuencias, a medida que aumenta la distancia (denotado en la figura 3.29 con la traza roja) [11].

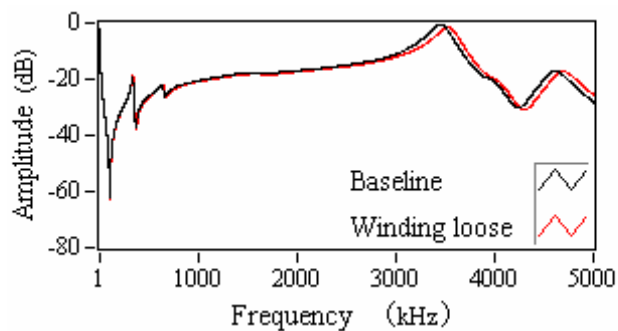


Figura 3.29. Respuesta en frecuencia para pérdida de la presión de apriete [11].

En la siguiente figura se observa cómo se desplaza la huella FRA (traza roja en la figura 3.30) para un desplazamiento de 2 mm [11].

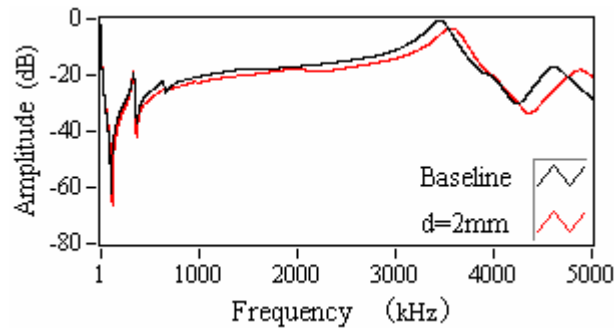


Figura 3.30. Huella FRA para un desplazamiento de 2 mm [11].

A medida que aumenta el desplazamiento, la traza FRA (en el rango de media frecuencia) se desplaza hacia frecuencias más altas (véase figura 3.29 y 3.30).

3.7.1.5. Presencia de un objeto extraño en la cuba

Se presenta una figura donde se observa la diferencia de una traza FRA realizada a un arrollamiento de AT con un objeto extraño (una llave de 200 mm de largo) en la estructura de cierre del mismo, en dos supuestos, uno de ellos flotante (indicado en la figura 3.31 con traza negra) y el otro conectado a una puesta a tierra (traza gris) [15].

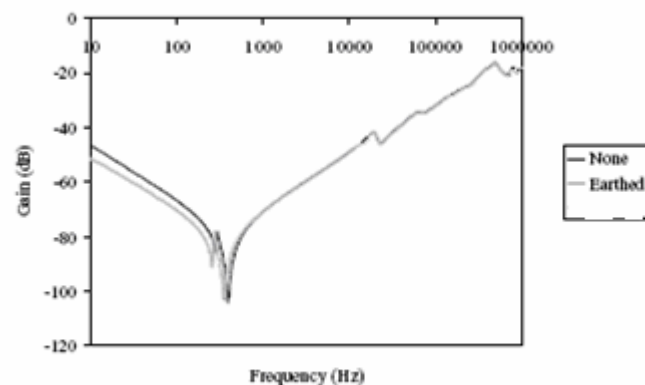


Figura 3.31. Respuesta en frecuencia para objeto extraño en la cuba [15].

Como se aprecia en la figura 3.31, hay diferencias significativas entre las trazas en el rango de baja frecuencia (hasta 800 Hz). Estas diferencias podrían confundirse con magnetismo residual [15].

3.7.2. Defectos eléctricos

A continuación se presentan diversas faltas eléctricas que pueden surgir en un transformador y su incidencia en la traza FRA.

3.7.2.1. Cortocircuito en la laminación del núcleo

El primer pico de resonancia se ve afectado por este fenómeno. Los cortocircuitos en la laminación del núcleo, causan un descenso en la inductancia de magnetización (aumento en la frecuencia natural del transformador) y un aumento de las EDDY currents en el núcleo, es decir, un aumento de las corrientes circulantes, debido al aumento de superficie. La figura se muestra a continuación [20].

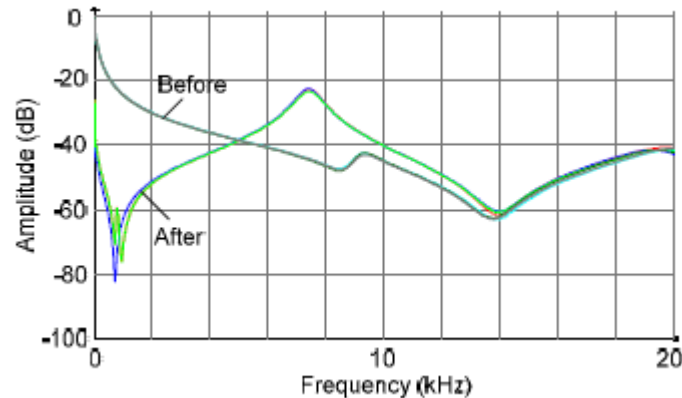


Figura 3.32. Respuesta en frecuencia para cortocircuito en el núcleo [20].

La respuesta en frecuencia del defecto se denota en la figura 3.32 por la traza azul.

3.7.2.2. Cortocircuito en una o más espiras

Los cambios en la huella FRA por este fenómeno, resultan en un aumento en frecuencia y una menor ganancia en el primer pico de resonancia [8]. Solamente con una espira en cortocircuito el fenómeno es destacable. Este defecto se puede confirmar o complementar con el ensayo de excitación y relación de transformación [7].

La siguiente figura muestra este defecto. Detectado en el devanado terciario conectado en triángulo [20].

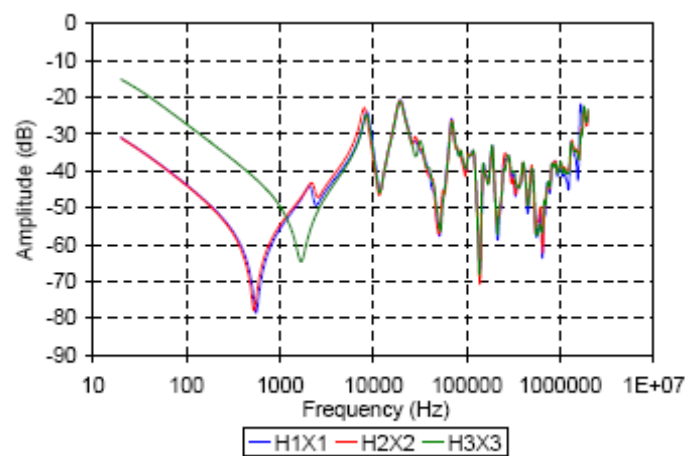


Figura 3.33. Respuesta en frecuencia para cortocircuito en espira [20].

Dicho defecto se observa en la figura 3.33 en la traza verde. Este tipo de respuesta es muy similar a la obtenida ante el defecto conocido como espiras adicionales en cortocircuito en el arrollamiento.

Los resultados de una medida realizada en un arrollamiento de AT. (fases A-B) con una espira adicional en cortocircuito alrededor de dos bobinas y sin en ella (traza negra). Se muestra en la figura 3.34.

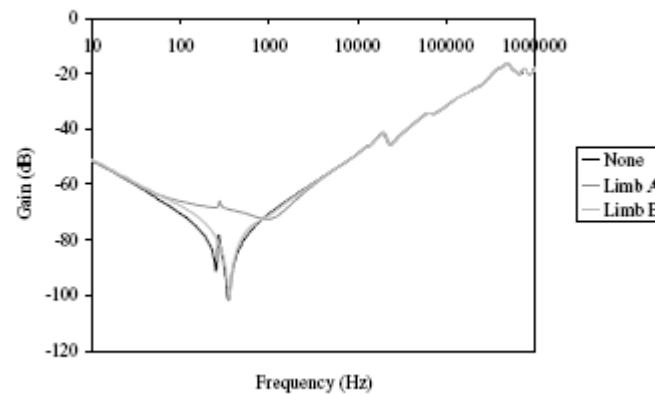


Figura 3.34. Respuesta en frecuencia con arrollamiento con espiras adicionales [15].

Como se observa en la figura 3.34, hay grandes cambios en la huella FRA para este tipo de falta en baja frecuencia, ya que eliminan prácticamente el primer pico de resonancia. La medida en otra fase también presenta la eliminación de ese primer pico de resonancia, sin embargo a partir de ahí no se altera la grafica [15].

3.7.2.3. Magnetismo residual

La magnetización del núcleo tiene un efecto considerable en el ensayo FRA debido a la densidad de flujo del núcleo. Este efecto se acentúa típicamente por debajo de los 5 kHz. A altas frecuencias las EDDY currents previenen la penetración del campo magnético entre la laminación del núcleo. En la figura 3.35 se muestra la huella FRA en un transformador antes y después del ensayo de resistencia, que al realizarse en corriente continua provoca la magnetización del núcleo.

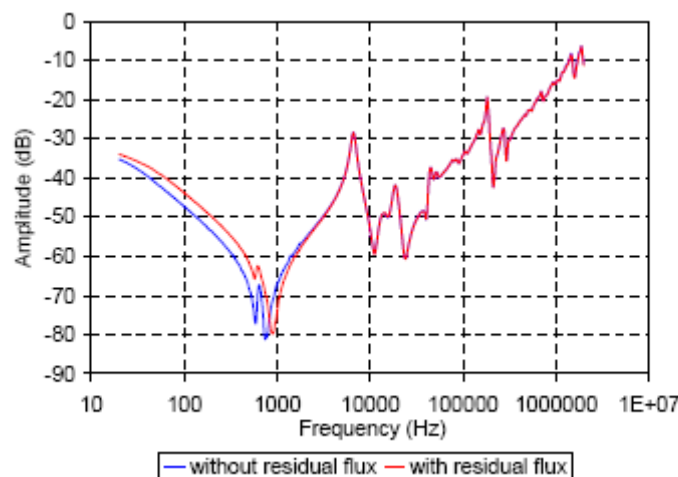


Figura 3.35. Comparación de transformador con magnetismo residual [20].

La magnetización residual, provoca una inductancia más baja, y consecuentemente un aumento de la frecuencia del primer pico de resonancia (traza roja de la figura 3.35). A altas frecuencias el resultado es idéntico. Esto se debe tener en cuenta para que la magnetización del núcleo sea igual a la hora de la realización de futuros ensayos [20].

3.7.2.4. Mala puesta a tierra de la cuba

La mala puesta a tierra se simula mediante resistencias de puesta a tierra de valor $1\ \Omega$, $100\ \Omega$ y $10\ \text{k}\Omega$ [15].

En la figura 3.36 pueden apreciarse estas diferencias.

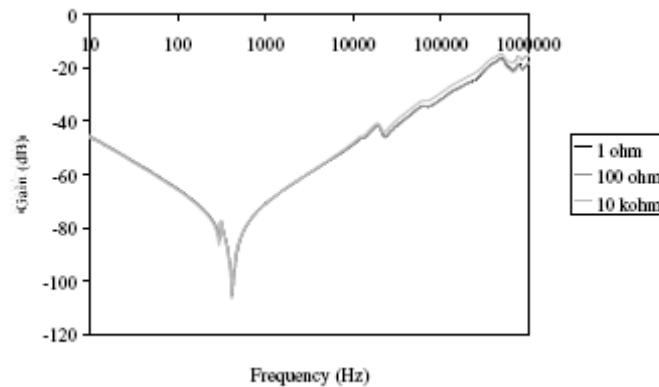


Figura 3.36. Respuesta FRA con mala puesta a tierra de la cuba [15].

Se puede observar que hay una pequeña variación en la ganancia, a partir del rango de frecuencias medias [15].

3.7.2.5. Núcleo flotante

Hay cambios prácticamente inapreciables. Esta falta puede ser confundida con una magnetización residual, ya que ambas provocan un cambio característico similar en la curva FRA [15]. La mejor forma de detectar este defecto es mediante la medida de capacidad entre arrollamientos [8].

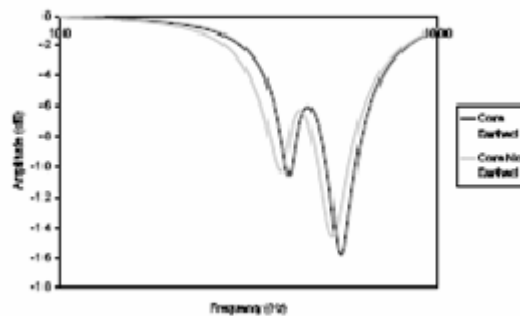


Figura 3.37. Respuesta en frecuencia para transformador con núcleo flotante [8].

Este defecto provoca un descenso de la frecuencia natural del transformador, efecto que se aprecia en la figura 3.37 a través de la traza gris.

3.7.2.6. Núcleo con múltiples puestas a tierra

Hay diferencias aparentes hasta los 800 Hz. Éstas son muy similares a las encontradas por el defecto de corrientes circulantes, debidas probablemente por la circulación de corriente por el camino ofrecido por las nuevas tierras [15].

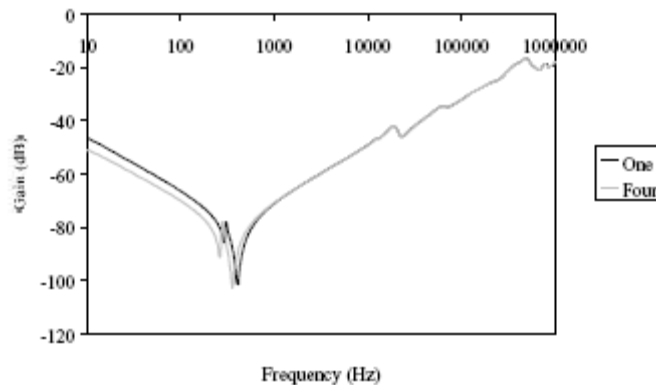


Figura 3.38. Respuesta en frecuencia para transformador con múltiples puestas a tierra [15].

Este defecto es muy similar al explicado en el apartado anterior, ya que como se observa en la figura 3.38, el primer pico de resonancia (traza gris) presenta un descenso de frecuencia.

3.7.3. Defectos de aislamiento

A continuación se presentan varios defectos de aislamiento del transformador y su influencia en la huella FRA.

3.7.3.1. Aislamiento flotante, pérdida de aislamiento entre devanados

La medida de aislamiento en este transformador, reveló una variación significativa de capacidad entre devanados y mostró un problema en la fase B (traza azul en la figura 3.39, derecha) [20].

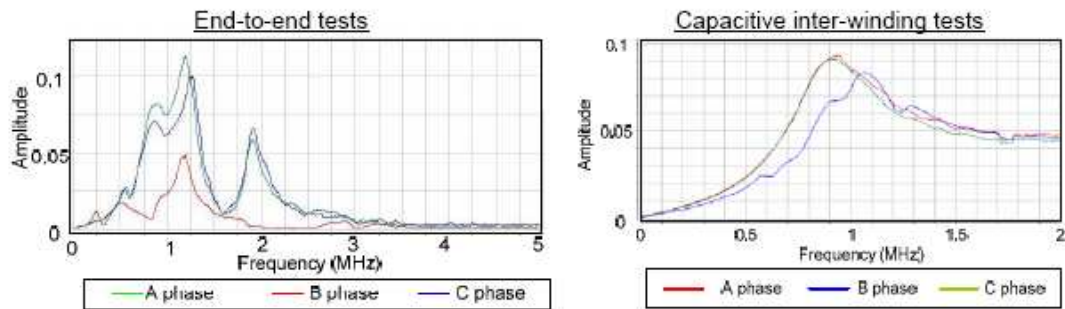


Figura 3.39. Respuesta en frecuencia para un transformador con pérdida de aislamiento [20].

3.7.3.2. Nivel de aceite

El efecto del aceite influye en la traza FRA. Un transformador con aceite implica que la alta permitividad de éste aumente la capacidad (por definición), y por lo tanto un menor valor en la frecuencia de resonancia, y en general, en todo el rango de frecuencia [20].

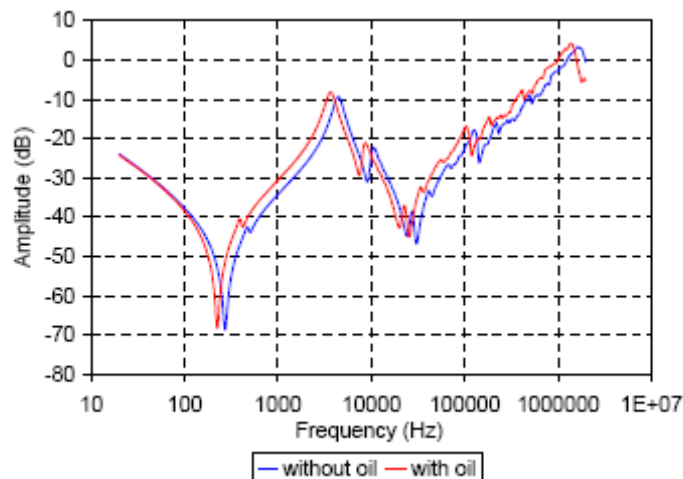


Figura 3.40. Respuesta en frecuencia para transformador con aceite (roja) y sin aceite (azul) [20].

Este fenómeno se puede apreciar en la figura 3.40, la cual muestra idéntica traza FRA pero desplazada en frecuencia (traza roja).

3.8. Interpretación de la huella FRA

3.8.1. Introducción

La comparación de la traza FRA se realiza para revelar información acerca de deformaciones mecánicas y condiciones eléctricas de los arrollamientos. Un cambio en las propiedades mecánicas implica un efecto en las propiedades eléctricas, tales como capacidades a tierra e inductancias, y consecuentemente un cambio en la huella FRA [9].

Por lo tanto, a partir de la comparación de dos trazas FRA, es posible establecer un diagnóstico del estado del transformador y detectar cualquier falta incipiente.

Como se ha visto, resulta imprescindible disponer de una buena medida de referencia y tener en cuenta todos los factores que pueden afectar a la medida [9].

3.8.2. Tipos de respuesta de FRA

Típicamente, las trazas FRA se presentan como curvas de amplitud frente a frecuencia, a veces complementadas por curvas de fase frente a frecuencia [20].

La figura 3.41 muestra las cuatro combinaciones posibles para representar la traza FRA:

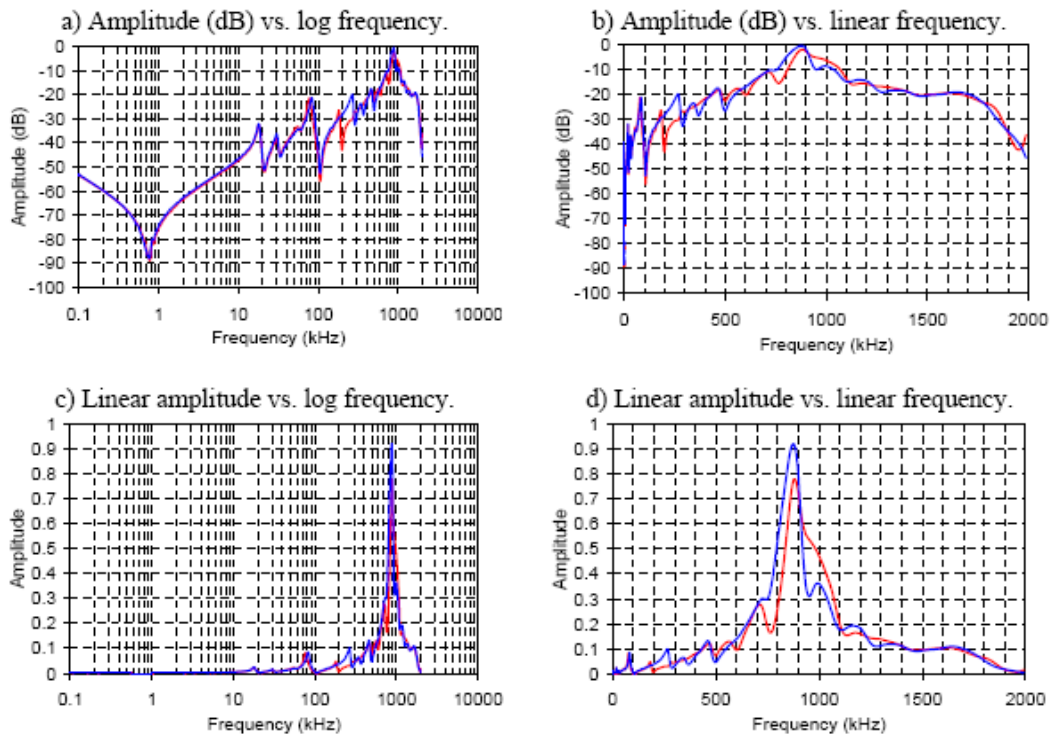


Figura 3.41. Diferentes escalas para trazas FRA [20].

La escala logarítmica para la amplitud (figura 3.41a, b), es preferible cuando las desviaciones aparecen en un amplio rango de frecuencia [20].

Los detalles dentro del rango de muy alta frecuencia se hacen más obvios con la escala lineal para la amplitud (figura 2.41c, d) [20].

La escala lineal para la frecuencia (figura 3.41b, d) realiza mayor énfasis a mayores frecuencias, por encima de 100 kHz, mientras que la escala logarítmica (figura 3.41a, c) proporciona el mismo peso a todo el rango de frecuencias. Típicamente, la escala utilizada tanto para amplitud como para la frecuencia suele ser la logarítmica (figura 3.41.a). Sin embargo, en caso de precisarse, se podría utilizar la escala lineal para entrar en mayor detalle en altas frecuencias [20].

3.8.3. Rango de frecuencia de interpretación

El rango de frecuencias de interpretación varía en función del transformador, es decir, varía en función de la tensión del mismo.

Dependiendo de la geometría del transformador se constituye una red pasiva RLC que interacciona de una manera u otra con la señal de entrada.

La siguiente figura muestra el rango de interpretación en función de la tensión del transformador considerando las limitaciones en función de la geometría y de las condiciones del flujo residual del transformador. La clasificación se basa en la tensión del transformador, lo cual implicará pasatapas de mayor tamaño y, por lo tanto, cables de mayor longitud, efecto que ya se explicó anteriormente [20].

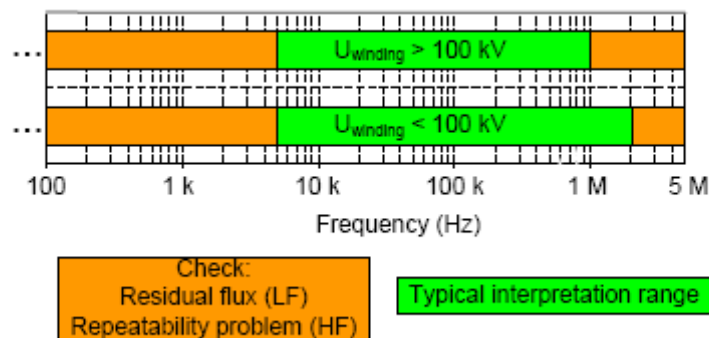


Figura 3.42. Rango de frecuencia de interpretación de ensayo FRA [20].

Nótese que el magnetismo residual, puede afectar en ambos casos en el mismo rango de frecuencias.

Para transformadores con un nivel de tensión elevado el rango de interpretación se encuentra limitado hasta 1-2 MHz, sin embargo para transformadores con un bajo nivel de tensión el rango de interpretación se eleva hasta incluso los 5 MHz [31].

A baja frecuencia son detectables las faltas debidas a espiras cortocircuitadas, ya que cambia las características magnéticas de la maquina y por lo tanto su respuesta. Las corrientes de circulación, si son demasiado grandes, pueden redirigir el flujo de dispersión y cambiar también la respuesta a baja frecuencia. Un núcleo flotante varía la capacidad a tierra del arrollamiento y también varía la respuesta [8].

A frecuencias medias son detectables cambios que involucren a todo el arrollamiento, esto es, movimientos axiales y radiales. Un movimiento axial se deberá a un aumento significativo en las frecuencias de resonancia, y por el contrario un descenso de éstas se deberá por un movimiento radial [8].

Pequeños cambios en el arrollamiento causan diferencias en las curvas a alta frecuencia, creando principalmente, nuevos picos de resonancia. La repuesta en alta frecuencia puede estar afectada por la cuba o por una mala puesta a tierra de las pantallas de los cables de medida [12].

3.8.4. Metodología de interpretación

3.8.4.1. Método directo de comparación

La comparación de resultados se realiza comparando la traza respecto a una histórica realizada en fábrica.

Entonces, se debe prestar especial atención a ciertas diferencias que pueden surgir [12]:

- Cambios en la forma de la curva.
- Creación de nuevos picos de resonancia o eliminación de otros existentes.
- Cambios en las frecuencias de resonancia, ya sea en amplitud o en frecuencia.

Este método es demasiado subjetivo, es decir, se basa más en la experiencia que en un modelo matemático y puede estar sujeta a la interpretación del individuo en cuestión [12].

Las trazas modelo que sirven como referencia para la comparación suelen ser:

- Huella digital histórica de la misma unidad.
- Comparación con transformador gemelo.
- Comparación con las otras fases del transformador (simetría de arrollamientos).

3.8.4.2. Comparación con histórico del transformador

Es el método más utilizado en comparación [17]. Es necesario que el ensayo haya sido reproducido en igualdad de condiciones que el ensayo anterior para no dar lugar a ambigüedades, ya que cualquier variación en la traza puede indicar un problema interno en el transformador. Además debe tenerse en cuenta el magnetismo remanente del transformador para evitar discrepancias a baja frecuencia [16].

Nótese que la posición del regulador puede influenciar en el resultado, así como cualquier método de ensayo que se tuviera en cuenta antiguamente debe de hacerse de igual modo.

En la siguiente figura se muestra una comparación de traza FRA realizada en un transformador para una fase.

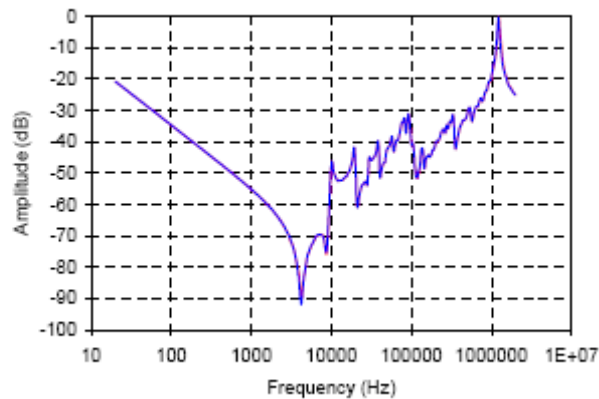


Figura 3.43. Comparación de huella FRA con ensayo histórico [20].

En la figura 3.43 se puede apreciar que ambas trazas son idénticas, ya que las condiciones del ensayo fueron las mismas [20].

3.8.4.3. Comparación con unidad gemela

A veces, no se disponen de ensayos históricos del transformador, por ejemplo en fábrica. Por lo tanto, lo que suele hacerse es comparar la traza FRA con una unidad gemela de idénticas características técnicas y, a ser posible, de idéntico fabricante [17].

Todas las comparaciones llevadas a cabo con una unidad gemela deben de hacerse para la misma posición del regulador [16].

Típicamente dos unidades gemelas muestran curvas idénticas. Sin embargo, siempre hay pequeños cambios entre las curvas, las cuales son generadas exclusivamente por la tolerancia de los fabricantes o por la magnetización del núcleo, por ejemplo, para caso de unidades monofásicas que no dispongan de históricos, como bancos de transformadores [20].

En la figura 3.44 se muestra la comparación entre unidades gemelas. Se aprecia como las frecuencias de resonancia están desplazadas.

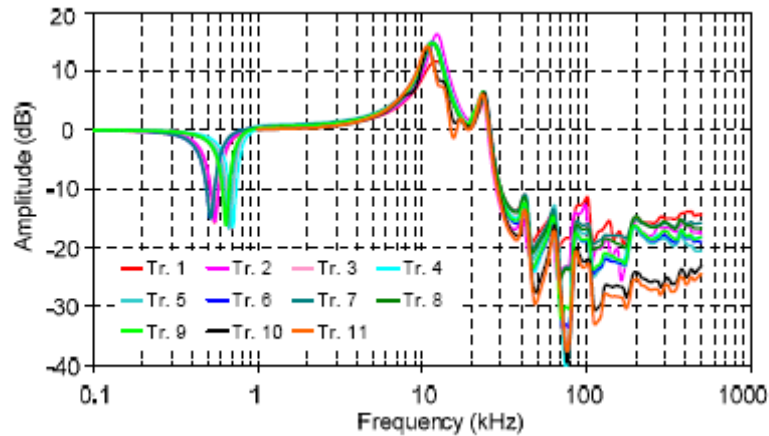


Figura 3.44. Comparación de huella FRA de varias unidades gemelas [20].

3.8.4.4. Comparación con otras fases del transformador

Los transformadores de potencia suelen diseñarse como un ensamble multi-fase, es decir, existe simetría constructiva entre las tres fases. Esta simetría también atañe a la condición eléctrica de los arrollamientos [20].

Los defectos mecánicos, como norma general, afectan típicamente a una de las fases, por lo que esta comparación resulta satisfactoria [17].

Además de ser una de las primeras utilizadas, en caso de discordancia se utiliza cualquiera de las anteriores. Sin embargo, la aplicabilidad de este método podría ser validado antes de hacerse el ensayo, ya que, por ejemplo, el grupo de conexión afecta a la medida (debido a que la conexión interna requiere de elementos diferentes), también el regulador, ya que las longitudes diferentes de los cables internos de conexión pueden introducir asimetría en las respuestas [20].

En la figura siguiente se muestra la comparación entre fases extremas, pero debido a las conexiones internas del cambiador de tomas o el diseño de la cuba, tienen respuestas diferentes [20].

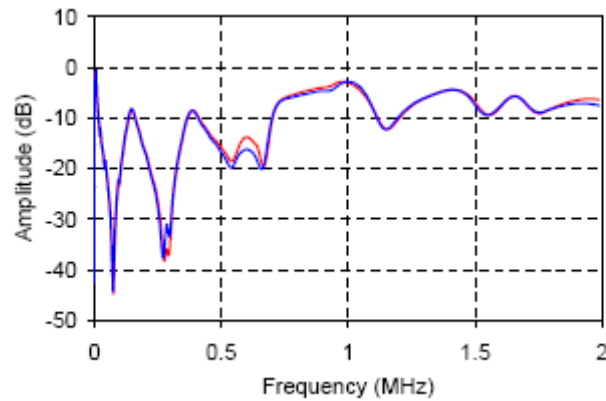


Figura 3.45. Comparación traza FRA entre fases [20].

3.8.5. Comparación mediante modelos matemáticos

Anteriormente, se ha estudiado el método de comparación directo, sujeto a la interpretación de expertos, y por lo tanto es un método muy subjetivo, a la vez que un poco ambiguo, ya que algunos defectos pueden ser malinterpretados.

El propósito de la parametrización consiste en reemplazar el gran número de medidas de impedancia con un pequeño número de parámetros, los cuales, contienen la información necesaria para diagnosticar cualquier tipo de falta [13].

3.8.5.1. Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación consiste en medir la similitud de la progresión de dos curvas. Se define como el cociente entre la covarianza (Cov) y la desviación estándar (σ): [9].

$$\rho(X,Y) = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_X * \sigma_Y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sqrt{Var(X) * Var(Y)}} \quad (12)$$

El coeficiente de correlación puede tomar valores entre -1 y +1. El factor de correlación describe la dependencia lineal de dos variables [9].

A bajas frecuencias, la respuesta está dominada por el primer pico de resonancia, caracterizada por su amplitud y frecuencia. A frecuencias medias, la información se puede extraer del coeficiente de correlación. A alta frecuencia, la información útil se extrae de examinar el número de picos de resonancia [13].

Así se utilizan seis parámetros para comparar este método [13]:

- El coeficiente de correlación en la década de 1 kHz a 10 kHz.
- El coeficiente de correlación en la década de 10 kHz a 100 kHz.
- El coeficiente de correlación en la década de 100 kHz a 1 MHz.
- Cambios relativos en la primera frecuencia de resonancia.
- Cambios relativos a la amplitud del pico de mínima frecuencia.
- Cambios relativos en el número de resonancias a alta frecuencia.

Todos estos parámetros se codifican representando los valores límites de una variación normal, en la siguiente tabla [13].

Parámetro	Límite de variación normal
Coeficiente correlación (1KHz-10 kHz)	0.995
Coeficiente correlación (10KHz-100 kHz)	0.995
Coeficiente correlación (100kHz-1 MHz)	0.995
Cambio en primera frecuencia de resonancia	0.9 a 1.1
Cambio en amplitud de un mínimo de LF	± 3 dBm
Cambio en número de resonancias de HF	1.2

Tabla 3.1. Límite de variación normal para los métodos de comparación de la huella FRA [13].

A partir de estos valores fijados para una variación normal, se pretende codificar estos parámetros para casos de una variación anormal.

Los posibles valores para cada parámetro se presentan en la siguiente tabla:

Parámetro	Valor	Código
Coeficiente de correlación	(normal)	0
	(normal) hasta 0.7	1
	< 0.7	2
Cambios relativos en la primera frecuencia de resonancia	(normal)	0
	(normal) hasta 1.25	1
	1.25 a 1.5	2
	1.5 a 5	3
	(normal)	9
	(eliminado)	8
Cambios relativos en la amplitud del mínimo de baja frecuencia	(normal)	0
	(normal) hasta 0.8	1
	0.8 a 0.2	2
	0.2	3
	>(normal)	9
Cambios relativos al numero de frecuencias de resonancia	(normal)	0
	>(normal)	1

Tabla 3.2. Codificación de parámetros [13].

Para un valor normal se ha elegido el código cero, y para el caso de un valor anormal adquiere el valor uno. Para el caso de la frecuencia de resonancia el valor 9 indica que ha disminuido, en caso del valor 8 indica que éste ha sido eliminado, para más detalles véase [13].

El valor del coeficiente de correlación es sensible a desplazamientos de la frecuencia natural del transformador [18].

3.8.5.2. Desviación espectral

La desviación espectral es un método estadístico para comparar la huella FRA, propuesto por Bak-Jensen. La desviación espectral entre X e Y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{x_i - (x_i + y_i)/2}{(x_i + y_i)/2} \right)^2 + \left(\frac{y_i - (x_i + y_i)/2}{(x_i + y_i)/2} \right)^2} \quad (13)$$

La desviación espectral proporciona datos confusos cuando la amplitud de trabajo está cercana a cero decibelios, por el contrario, resulta una buena herramienta para complementar al coeficiente de correlación cuando la amplitud es bastante grande [19].

3.8.5.3. Máxima diferencia absoluta (DBAS)

Se define el parámetro entre X e Y como sigue a continuación:

$$DBAS(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^N y_i - x_i}{N} \quad (14)$$

La máxima diferencia absoluta es de gran utilidad cuando se producen cambios en la traza FRA debido a creación de nuevos picos de resonancia o la eliminación de éstos. Cambios en las frecuencias existentes de resonancia o diferencias de amplitud que no sean constantes [18].

3.8.5.4. Comparación de resultados de FRA con otras técnicas de diagnóstico

Los resultados de la traza FRA pueden ser utilizados para confirmar o complementar otros resultados anómalos de otras técnicas de diagnóstico del transformador.

Éstas son [16]:

- Ensayo de excitación por fase.
- Relación de transformación.
- Impedancia de cortocircuito.
- Resistencia de arrollamiento.

3.8.5.4.1. Ensayo de excitación por fase

Los resultados de la corriente de excitación por fase se pueden comparar con el ensayo FRA realizado a circuito abierto por fase. Este test, como se analizó anteriormente, está fuertemente influenciado por las propiedades del núcleo en lo que se refiere a la frecuencia de resonancia. En los resultados de FRA se espera un patrón similar a los resultados de la corriente de excitación [16].

3.8.5.4.2. Relación de transformación

La función de transferencia de tensión (ya sea en dB o en Ω), se utiliza para comprobar la relación de transformación. Varias frecuencias alrededor de la frecuencia de resonancia pueden revelar el valor de la relación de transformación [16].

3.8.5.4.3. Impedancia de cortocircuito

Medida que se realiza cortocircuitando el arrollamiento enfrentado al de ensayo, realizando una medida end-to-end, se elimina la influencia del núcleo en el primer pico de resonancia, o lo que es lo mismo, la frecuencia natural del transformador se desplaza hacia frecuencias más altas [16].

3.8.5.4.4. Resistencia de arrollamiento

Si la traza a circuito abierto produce una respuesta horizontal a frecuencias menores de 30 Hz, entonces los resultados de la traza FRA pueden compararse a la resistencia de arrollamiento. Cualquier diferencia entre fases a bajas frecuencias podría comprobarse mediante la resistencia de arrollamiento [16].

Capítulo 4 Frecuencia natural

4.1. Introducción

La respuesta FRA de los transformadores de potencia tiene diferentes regiones en frecuencia, afectadas por unos u otros componentes.

La respuesta FRA se puede dividir en tres rangos de frecuencia, influenciadas por el núcleo, arrollamiento y las condiciones de medidas desde la baja a la alta frecuencia. La amplitud de los rangos de frecuencia depende del transformador bajo ensayo y de la capacidad del equipo de medida.

4.2. Aspecto general de la traza FRA

Las medidas habituales FRA de transformadores entre principio y final (end-to-end) son aproximadamente medidas de admitancia (7), ya que la impedancia de $50\ \Omega$ con la que se cierra el arrollamiento es resistiva y de un valor óhmico muy inferior al que presenta el arrollamiento bajo ensayo. Aunque en un transformador los diferentes arrollamientos están conectados entre sí por capacidades parásitas [28].

A continuación se muestra el circuito equivalente del transformador y que se empleará para analizar diferentes casos.

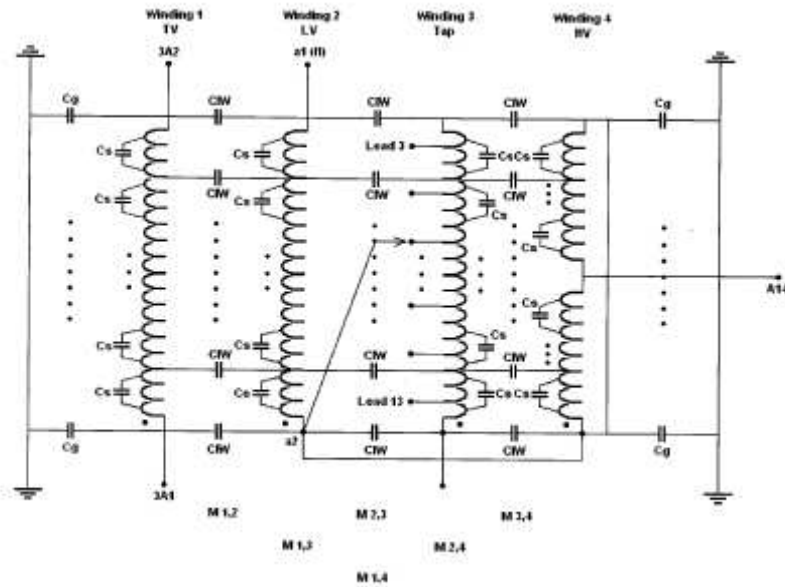


Figura 4.1. Circuito equivalente del transformador a alta frecuencia [28].

Para un primer análisis simplificado de la traza FRA cabe despreciar el efecto del resto de los arrollamientos no alimentados (salvo si están en cortocircuito, en cuyo caso se han de considerar) y representar sólo el devanado excitado. De esta forma, el circuito equivalente del transformador es el mostrado en la figura 4.2 [28].

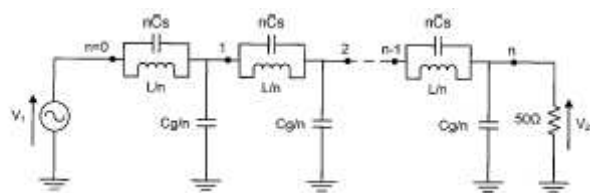


Figura 4.2. Circuito equivalente reducido del transformador a alta frecuencia [28].

El circuito de la figura 4.2 puede ser muy complejo de estudiar, especialmente si el arrollamiento del transformador tiene discos entrelazados y discos continuos.

Sin embargo, el estudiar los dos casos extremos es sencillo, y puede ser de utilidad.

a) Caso de que la capacidad a tierra sea despreciable.

Esto es lo que suele ocurrir en transformadores pequeños, pues en ellos el condensador formado por un arrollamiento y tierra (por ejemplo el condensador formado por el arrollamiento de AT y la cuba, o el formado por el arrollamiento de BT y el núcleo) tiene un valor muy pequeño [28]. Para ver esto último, se puede asimilar los condensadores mencionados a condensadores de placas cilíndricas concéntricas. En este tipo de condensadores la capacidad es (15):

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{a}{b}} \quad (15)$$

Siendo:

C : capacidad del condensador cilíndrico (F)

ϵ_0 : permitividad (F/m)

l : longitud del arrollamiento (m)

a : radio del núcleo (m)

b : radio del arrollamiento de BT (m)

Con lo que al separarse las armaduras la capacidad disminuye. Además, en este tipo de transformadores la altura del arrollamiento es reducida.

Si en el circuito de la figura 4.2, se desprecia la capacidad derivación queda el circuito de la figura 4.3 [28].

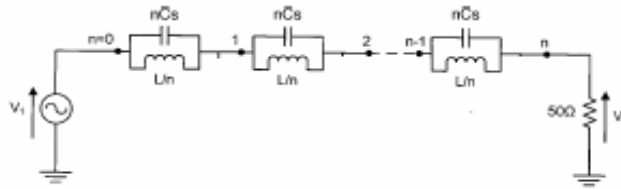


Figura 4.3. Capacidad derivación despreciable [28].

El comportamiento en frecuencia del circuito de la figura 4.3 es muy sencillo de analizar.

A bajas frecuencias un arrollamiento se comporta de forma inductiva, por lo que la admitancia disminuye de forma inversamente proporcional a la frecuencia, y en escala logarítmica con pendiente -20 dB por década.

A la frecuencia:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_s}} \quad (16)$$

Siendo:

L : inductancia (H)

C_s : capacidad serie (F)

El circuito de la figura 4.3 entra en resonancia y las celdillas LC del circuito se comportan como circuitos abiertos, con lo cual la tensión V_2 de la figura 4.3 es cero y se tiene una antiresonancia. Evidentemente, el análisis realizado es un estudio simplificado, ya que en la realidad la tensión V_2 no será cero sino muy pequeña, y la cuantía de ésta (y por tanto del pico de antiresonancia) depende de la resistencia del arrollamiento. El circuito de la figura presenta una única frecuencia de resonancia.

A muy altas frecuencias, en el circuito de la figura 4.3 predomina la capacidad, por lo que la traza FRA es creciente con una pendiente aproximadamente igual a 20 dB por década.

El diagrama resulta:

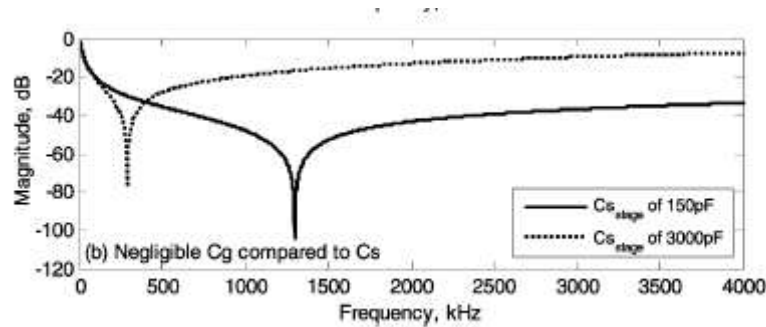


Figura 4.4. Capacidad derivación despreciable frente a capacidad serie [28].

b) Caso de que la capacidad serie sea despreciable.

En los transformadores de altas tensiones y potencias se utilizan transformadores con una capacidad serie aumentada para que el comportamiento del transformador ante sobretensiones de tipo impulso sea mejor. En estos casos el cociente entre la capacidad a tierra y la capacidad serie suele ser (17):

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_g}{C_s}} \quad (17)$$

No obstante, el caso que ahora se analizará es un caso idealizado, pues para el estudio se desprecia la capacidad serie.

El análisis que se va a exponer en este apartado también es cierto en un transformador cualquiera para frecuencias no demasiado altas, ya que cuando esto ocurre, la inductancia de dispersión prevalece sobre la capacidad serie, y de esta forma, el circuito equivalente es una “T” en la que en los brazos horizontales se tiene la reactancia de dispersión y en el brazo vertical se tiene la capacidad de derivación [28], según se observa en la figura 4.5.

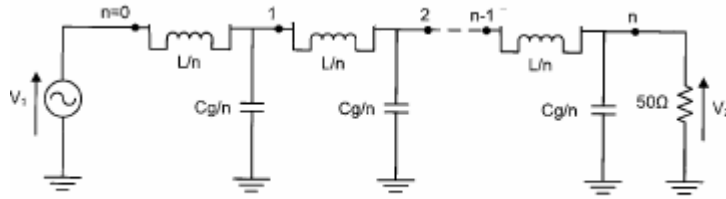


Figura 4.5. Capacidad serie despreciable [28].

A bajas frecuencias el circuito de la figura 4.5 se comporta de forma inductiva, por lo que la admitancia disminuye de forma inversamente proporcional a la frecuencia, y en escala logarítmica con pendiente -20 dB por década.

A muy altas frecuencias, en el circuito de la figura 4.5, predomina la capacidad, por lo que la traza FRA es creciente con una pendiente aproximadamente igual a 20 dB por década.

En este caso en la zona se tendrán k frecuencias igualmente separadas, de valor:

$$f_k = \frac{k}{2\pi\sqrt{LC_g}} \quad (18)$$

Siendo:

L : inductancia (H)

C_g : capacidad de derivación (F)

Con ello la traza FRA queda como la mostrada en la figura 4.6

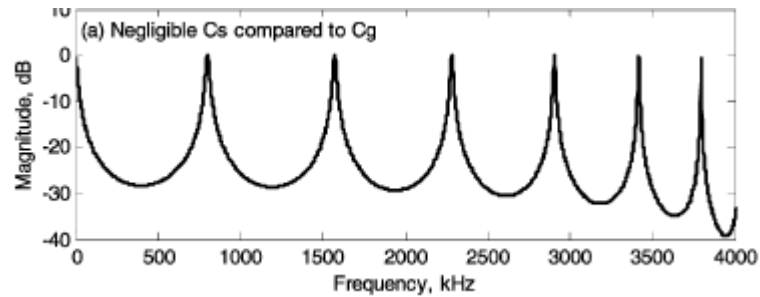


Figura 4.6. Traza FRA para capacidad serie despreciable [28].

c) Caso general.

El caso general para en el que las capacidades serie y derivación no pueden despreciarse es difícil de analizar. Para mayores detalles puede verse [28]. Las frecuencias de resonancia de este circuito son las de la siguiente expresión [28]:

$$f_k = \frac{k\pi}{2\pi\sqrt{LC_g + (k\pi)^2 LC_s}} \quad (19)$$

Siendo:

L : inductancia (H)

C_g : capacidad de derivación (F)

C_s : capacidad serie (F)

4.3. Comportamiento en frecuencia de una red RLC

A baja frecuencia, un devanado se puede modelar como una línea de transmisión en la que la capacidad serie puede ser despreciada [26]. En la misma, la respuesta FRA en una medida end-to-end disminuye a medida que aumenta la frecuencia, con una pendiente de aproximadamente 20 dB por década [28]. A medida que la inductancia del núcleo se hace mayor la respuesta es más pequeña.

La respuesta del devanado de AT tiene mayor magnitud (ganancia negativa) que el arrollamiento de BT debido a la relación de transformación.

Para el caso de transformadores monofásicos la respuesta FRA a baja frecuencia consta de un único pico de resonancia; sin embargo, para el caso de transformadores trifásicos la respuesta en frecuencia de la fase central es diferente a las fases extremas, ya que el circuito magnético es asimétrico. Es decir, el flujo magnético es diferente entre las fases extremas y la central.

En el rango de frecuencias medias, la combinación de la inductancia de dispersión y las capacidades serie entre espiras resulta en un paralelo LC. Un paralelo LC produce un pico de antiresonancia en la respuesta de la medida end-to-end, y consecuentemente bloqueando la señal a esa frecuencia. Este pico de antiresonancia se traduce en la curva de ganancia en un mínimo, o vulgarmente conocido como “valle”, la cual tiene un valor alto de ganancia [28].

A altas frecuencias el arrollamiento se comporta como un elemento capacitivo, debido al circuito paralelo de las capacidades serie, haciendo que el valor de la inductancia sea menor. Después de la frecuencia natural del transformador, la curva de ganancia aumenta con una pendiente de 20 dB por década, debido al comportamiento capacitivo antes mencionado [28].

La representación de una combinación LC en serie es una conexión en “T”, donde la capacidad a tierra conecta entre las dos mitades de la inductancia del arrollamiento. La respuesta de la medida de este tipo de conexión provoca un pico de resonancia, amplificando la señal a esa frecuencia en particular. Esta resonancia es un máximo local o conocida como “pico” caracterizada con un valor pequeño de ganancia [28].

El comportamiento básico del circuito antes mencionado se muestra en la figura 4.7.

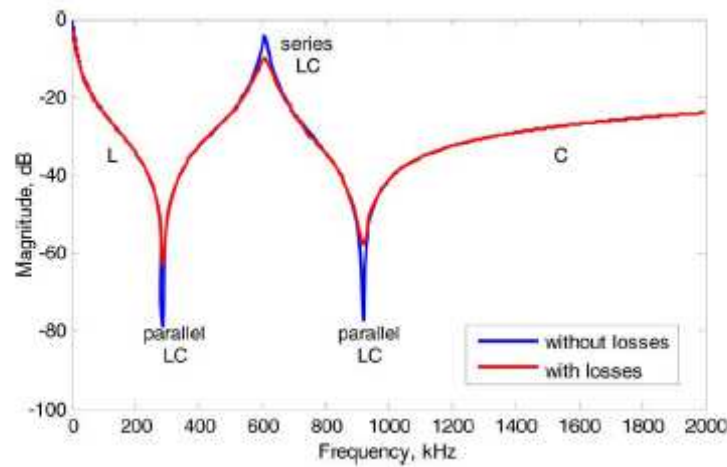


Figura 4.7. Comportamiento de la respuesta FRA [28].

Sin embargo para un transformador, el circuito equivalente consta de una red compleja RLC [28].

4.4. Frecuencia natural

4.4.1. Conceptos generales

El comportamiento transitorio de cualquier tipo de circuito RLC, al que se le aplica una tensión, se basa en determinar la localización de los polos y ceros de la impedancia; ésta es una función del plano complejo.

La respuesta FRA de un arrollamiento puede contener un número infinito de frecuencias naturales, por lo que resulta necesario representar el devanado como un número finito de elementos distribuidos [27].

4.4.2. Circuito equivalente

Principalmente los elementos que constituyen el circuito equivalente son resistencias, inductancias, y condensadores [28].

Se considera C_g como la capacidad a tierra del arrollamiento y C_s como la capacidad serie total de un arrollamiento. Dividiendo el arrollamiento en N conductores se tiene que la capacidad a tierra de cada conductor será C_g/N y la capacidad serie NC_s . La capacidad a tierra, a su vez, se puede concentrar a la mitad de cada una de las secciones. Cada sección tiene la mitad de una inductancia propia, denominada L , y una inductancia mutua, denominada M_n [27].

Para este tipo de circuito se consideran las pérdidas despreciables para que resulte un poco más sencillo.

El circuito equivalente se presenta a continuación en la siguiente figura:

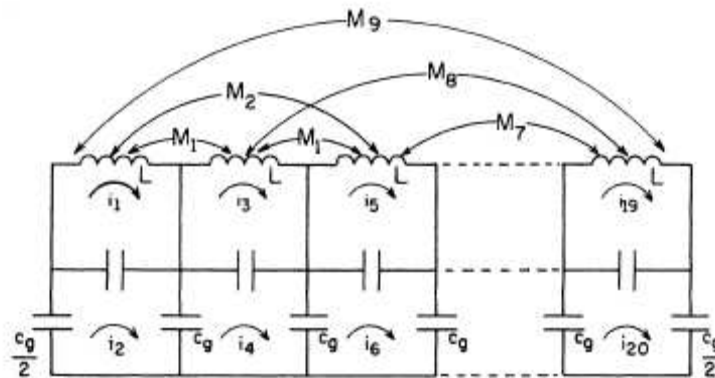


Figura 4.8. Circuito equivalente de diez elementos de una bobina de un devanado [27].

En la figura 4.8 se puede apreciar que se ha tenido en cuenta el efecto de las inductancias mutuas. Este efecto se presenta con mayor detalle en la siguiente figura:

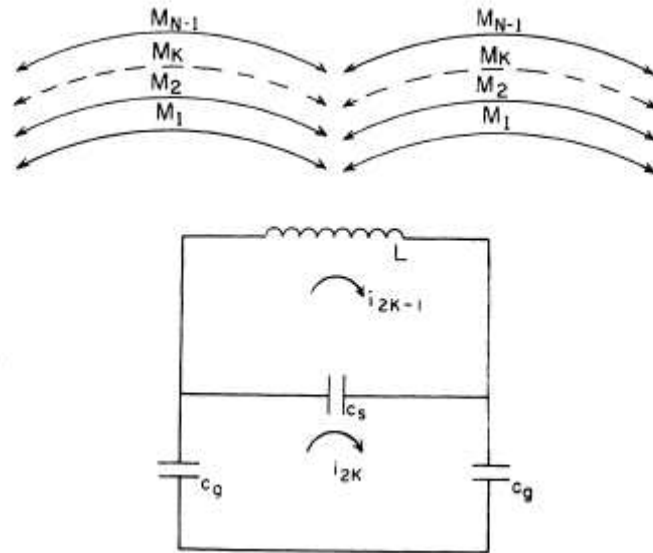


Figura 4.9. Circuito general para N elementos [27].

4.4.3. Evaluación numérica

La frecuencia natural del transformador se encuentra afectada por la capacidad a tierra y la inductancia magnetizante, por lo que se estudiará como si de una red RLC se tratara.

4.4.3.1. Parámetro alfa

La constante de espaciado α es un parámetro global, que refleja la relación entre la capacidad a tierra y la capacidad serie total del arrollamiento, por lo que no refleja aspectos no lineales de partes de éste [28].

Este parámetro disminuye a medida que aumenta el nivel de tensión del transformador, aunque no presenta una relación con el nivel de tensión [22].

El valor medio de α para un transformador trifásico con devanados de discos concéntricos se muestra en la figura 4.10:

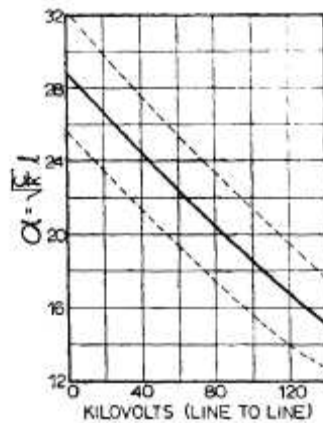


Figura 4.10. Factor α en función de la tensión nominal del transformador [22].

Este parámetro (17) es válido para transformadores en baño de aceite, ya que al vaciar el transformador de aceite disminuye la capacidad a tierra debido a que se suprime el agente aislante, y por lo tanto la permitividad del medio será diferente [22].

La variación del parámetro alfa puede variar la frecuencia natural del transformador. Por ejemplo, si dicha constante tiene un valor de 20, una variación de un 10% puede provocar un cambio en el primer y cuarto pico de resonancia en al menos 1 y 3% respectivamente [22].

4.4.3.2. Inductancia magnetizante

La inductancia magnetizante se puede calcular mediante la expresión:

$$L_m = N^2 / R \quad (20)$$

Siendo [28]:

L_m : inductancia magnetizante (H)

N : número de espiras

R : reluctancia del circuito magnético (H^{-1})

La Reluctancia magnética se calcula como sigue a continuación:

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (21)$$

Siendo [28]:

l : longitud del camino magnético (m)

A : sección del núcleo (m^2)

μ : permeabilidad magnética (H/m)

4.4.3.3. Frecuencia natural del transformador

El primer pico de resonancia o frecuencia natural del transformador tiene lugar cuando la parte reactiva del circuito se compensa, es decir, la respuesta en frecuencia es puramente resistiva [12].

Matemáticamente se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_g}} \quad (22)$$

Siendo:

f_r : frecuencia natural del transformador (Hz)

L : inductancia magnetizante (H)

C_g : capacidad a tierra (F)

Como se ha visto, la frecuencia de resonancia está caracterizada por los parámetros de una bobina y un condensador. Ahora se procede a definir los valores de impedancia (capacitiva e inductiva), los cuales ya dependen de la frecuencia.

El valor de la impedancia inductiva es:

$$Z_L = j\omega L \quad (23)$$

Siendo:

ω : pulsación (rad/s)

L : inductancia (H)

Para el caso de la impedancia capacitiva, es:

$$Z_c = \frac{1}{j\omega C} \quad (24)$$

Siendo:

ω : pulsación (rad/s)

C: capacidad (F)

El valor de la impedancia en función de la frecuencia se presenta en la figura 4.11.

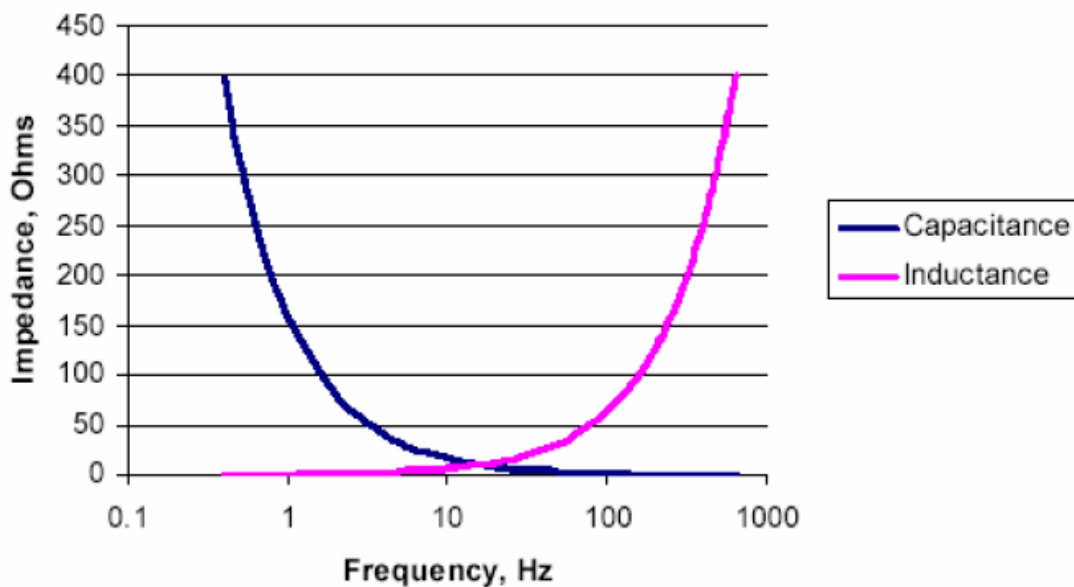


Figura 4.11. Respuesta en frecuencia de reactancia inductiva (rosa) y capacitiva (azul) [34].

En esta misma figura se aprecia como la impedancia inductiva (23) es directamente proporcional a la frecuencia (curva rosa). Para el caso de la impedancia capacitiva (curva azul), ocurre lo contrario, es decir, a medida que aumenta la frecuencia ésta se hace menor.

Como ya se ha comentado, el ensayo FRA consiste en una medida de admitancia, por lo que la traza FRA de un condensador y bobina ideales será inversamente proporcional. La huella FRA para una bobina ideal se presenta en la figura 4.12.

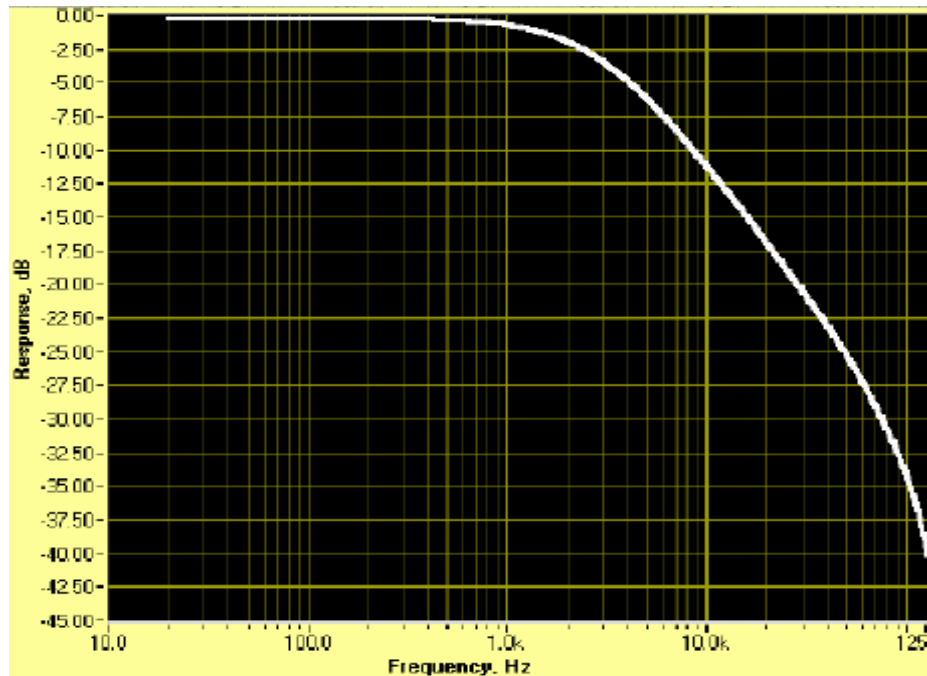


Figura 4.12. Traza FRA de una bobina ideal [34].

Se aprecia que las curvas representadas en la figura 4.11 (rosa) y la figura 4.12 son inversas.

Para el caso de una capacidad ideal, la traza FRA es la mostrada en la figura 4.13:

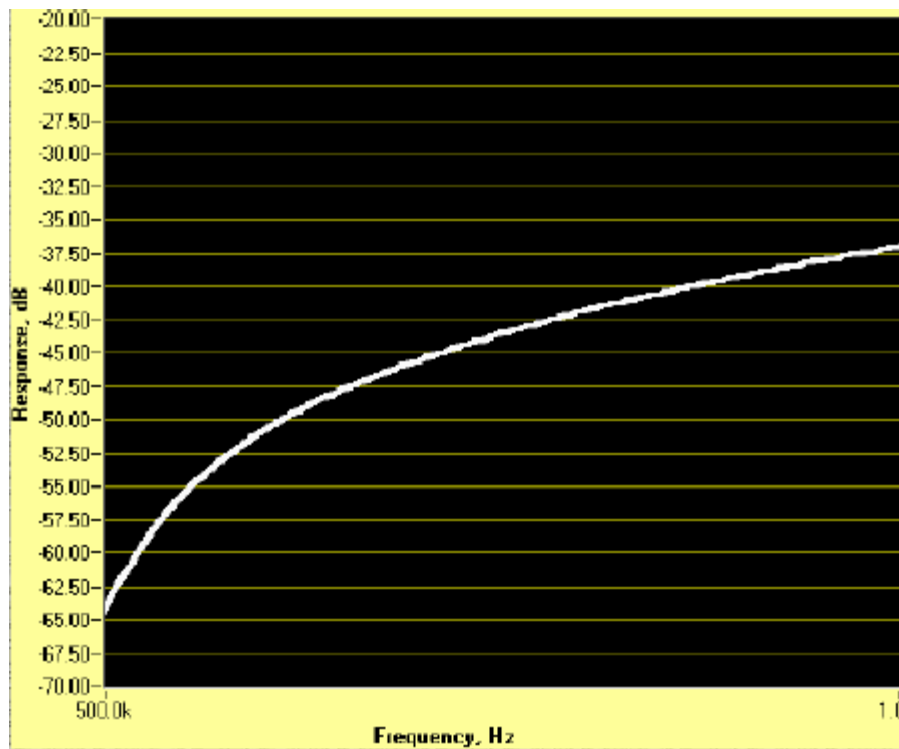


Figura 4.13. Traza FRA de una impedancia capacitiva ideal [34].

En la figura 4.13 se observa cómo la traza FRA es inversa a la obtenida en el caso de la respuesta en frecuencia de la impedancia (detallado en la figura 4.11 con la traza azul).

La siguiente figura muestra cómo interaccionan los diferentes elementos del arrollamiento del transformador para obtener la traza FRA de la frecuencia natural.

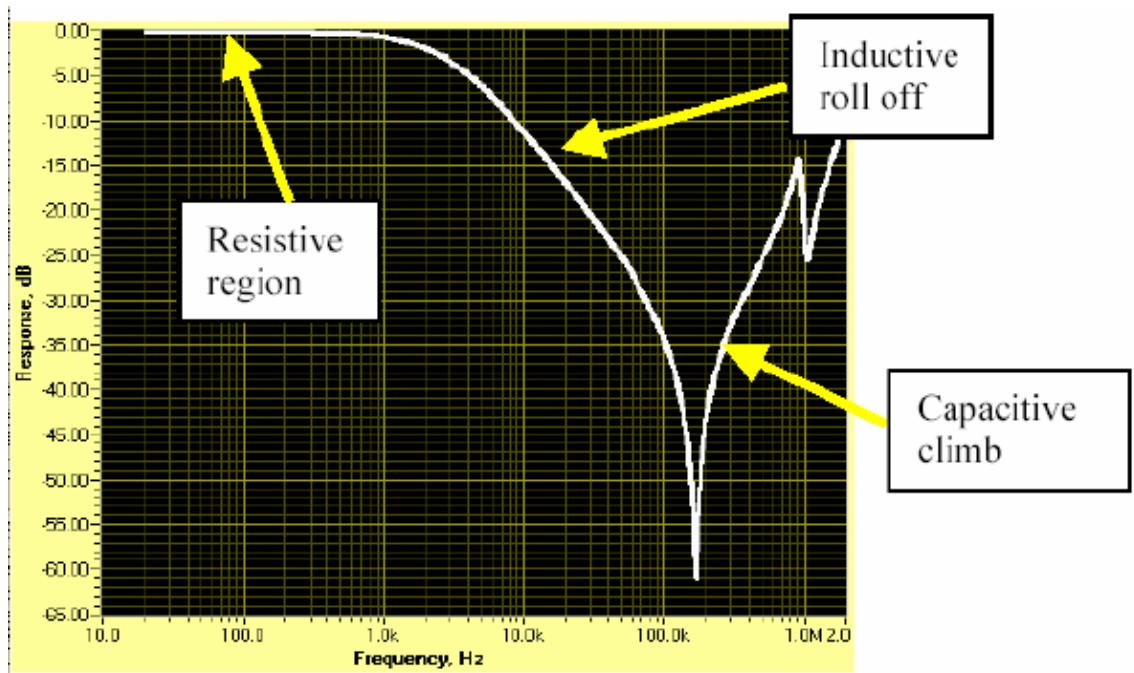


Figura 4.14. Huella FRA de un devanado [34].

La figura 4.14 ilustra el fenómeno de la frecuencia natural del transformador, ésta puede dividirse en tres rangos: resistivo, debido al arrollamiento; inductivo, debido al núcleo del transformador y capacitivo, debido a la capacidad a tierra del arrollamiento ensayado a medida que aumenta la frecuencia [12].

La respuesta en frecuencia es sensible a cualquier cambio de estos parámetros físicos. Cualquier cambio en la inductancia o capacidad ocasionará un desplazamiento de la fase o creación de nuevas resonancias, y por lo tanto, podrá ser asociado a un tipo determinado de falta [26].

Estos cambios en los elementos se presentan en la siguiente tabla:

Parámetro físico	Tipo de falta
Inductancia	Deformación de discos, rotura local, cortocircuito de espiras
Capacidad a tierra	Movimiento de discos, Buckling, pérdida de presión de apriete
Capacidad serie	Pérdida de aislamiento

Tabla 4.1. Correlación entre cambios de parámetros del transformador y tipo de falta [26].

La tabla 4.1 muestra los tipos de faltas más comunes y su efecto en el parámetro físico del transformador.

Capítulo 5 Resumen y conclusiones

5.1. Resumen

En el presente PFC se ha realizado una revisión bibliográfica de la técnica FRA.

En la tabla 6.1 se resumen las condiciones que pueden encontrarse en un transformador y la capacidad del ensayo FRA de detectarlos.

Condición	Detectabilidad	Rango de frecuencia
Mala puesta a tierra de la cuba	Detectable	10 kHz-1 MHz
Núcleo flotante	Detectable Puede confundirse con magnetismo residual	10 Hz-1 kHz
Múltiple puesta a tierra del núcleo	Detectable Puede confundirse con magnetismo residual	10 Hz-1 kHz
Objeto extraño en la cuba	Detectable Puede confundirse con magnetismo residual	10 Hz-1 kHz
Mal contacto	Fácilmente detectable	10 Hz-1 MHz
Espiras adicionales en cortocircuito	Fácilmente detectable	10 Hz-5 KHz
Cortocircuito en espira	Detectable	10 Hz-5 KHz
Magnetismo remanente	Detectable	10 Hz-5 KHz
Movimiento axial	Detectable	200 Hz-1 MHz

Movimiento radial	Detectable	50 kHz-1 MHz
Pérdida de aislamiento	Detectable	200 kHz-3 MHz
Nivel de aceite	Fácilmente detectable	100 Hz-3 MHz
Pérdida de la presión de apriete	Detectable	100 kHz-1 MHz
Cortocircuito en laminación del núcleo	Detectable Puede confundirse con cortocircuito en espira	10 Hz-15 kHz

Tabla 5.1. Detectabilidad de faltas.

5.2. Conclusiones.

El ensayo FRA es una técnica sencilla, repetible y reproducible, y presenta baja relación señal-ruido. No obstante, es necesario establecer un criterio de medida y debe ser realizado posteriormente con la mayor precisión posible, pues se encuentra fuertemente afectado por las condiciones de medida.

El primer pico de resonancia o frecuencia natural, se encuentra muy afectado por la inductancia magnetizante y por la capacidad a tierra del transformador, como se ha visto anteriormente. Dichos parámetros son difíciles de variar de forma voluntaria, sin embargo, el primero está muy ligado a la condición magnética de la máquina, y por lo tanto al ciclo de histéresis de ésta. El segundo está ligado a los desplazamientos o cambios geométricos internos del transformador, y como se analizó en el capítulo 4, a variaciones de la capacidad del transformador.

Índice de términos

AT: devanado de Alta tensión.

BT: devanado de Baja tension.

CEI: international Electrotechnical Commission.

DGA: dissolved gas analysis.

End-to-end: procedimiento de medida principio-final, resto de arrollamientos no alimentados en circuito abierto.

FDS: frequency dielectric spectroscopy.

FRA: frequency response Analysys.

HF: low frequency.

IFRA: Impulse frequency response Analysis.

LF: high frequency.

PCB: polychlorinated biphenyls.

PDC: polarisation and Depolarisation Current.

RLC: circuito pasivo compuesto por resistencias, bobinas y condensadores.

RVM: recovery Voltage Measurement.

SFRA: sweep frequency response Analysis.

TF: transfer function.

UNE: una norma Española.

Referencias

- [1]. Tomas Hasman, Vladislav Kavsnicka and Jonko Totev “Sensitivity of methods for diagnostics of power transformer windings”.. High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999. Conference Publication N° 467, (c) IEEE, 1999.
- [2] Martin Hassig, Reinhold Braunlich “Technique and evaluation of FRA-measurements on large power transformers”. XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands 2003, Smit(ed.) ISBN 90-77017-79-8.
- [3] J.A.S.B. Jayasinghe, Z.D. Wang, P.N. Jarman and A.W. Darwin. “Investigations on sensitivity of FRA technique in diagnosis of transformer windig deformations”. Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, IN USA, 19-22 September 2004.
- [4] M. Wang and A.J. Vandermaar. “K.D.Srivastava.Tansformer winding movement monitoring in service key-factorsaffecting FRA measurements”. September/October 2004- Vol.20, No 5.
- [5] K.G. Nilanga, B. Abeywickrama, Yuriy V.Serdyuk, and Stanislaw M.Gubanski “Exploring possibilities for characterization of power transformer insulation by frequency response analysis (FRA)” IEEE transactions on power delivery, Vol.21, N° 3, July 2006.
- [6] K. Ragavan and L. Satish. “Localization of changes in a model winding based on terminal measurements: Experimental study”.. IEEE transactions on power delivery, Vol.22, N° 3, July 2006
- [7] Syed Moziful Islam, Senior Member IEEE “Detection of Shorted Turns and Winding Movements in Large Power Transformers using Frequency Response Analysis”.. 0-7803-5935-6/00/\$10.00 (c) 2000 IEEE.
- [8] S.A. Ryder “Diagnosing a wider range of tranformer faults using frequency response analysis”.. XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands 2003, Smit(ed.) ISBN 90-77017-79-8.
- [9] R. Wymer, S. Tenbohlen, M. Heindl, A. Kraetge, M. Kruger and J. Christian. “Development Of Algorithmics to Assess The FRA”. XVth International Symposium on High Voltage Engineering. University of Ljubljana, Eleectroinstitut Milan Vidmar, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007.

- [10] E. Rahimpour and S. Tenbohlen. "A Mathematical Model to Investigate Disc Space Variation In Power Transformer Using Transfer Function Analysis". XVth International Symposium on High Voltage Engineering. University of Ljubljana, Eleectroinstitut Milan Vidmar, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007
- [11] Liu Yun-peng, Hu Wei-tao, Lu fang-cheng, Feng Zhi-guo. "Research on sensitivity and criterion of wide band FRA method detecting transformer winding deformations". XVth International Symposium on High Voltage Engineering. University of Ljubljana, Eleectroinstitut Milan Vidmar, Ljubljana, Slovenia, August 27-31, 2007
- [12] S.A. Ryder. "Diagnosing Transformer Faults Using Frequency Response Analysis". IEEE Electrical Insulation Magazine. 0883-7554/03/\$17.00(c)2003 IEEE.
- [13] Simon Ryder. "A New Method For Diagnosing Transformer Faults Using Frequency Response Analysis".
- [14] D.M. Sofian, Z.D. Wang and P. Jarman. "Interpretation Of Transformer Fra Measurements Results Using Winding Equivalent Circuit Modelling Technique". 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- [15] Simon A. Ryder. "Transformer Diagnosis Using Freuquency Response Analysis: Results From Fault Simulations". 0-7803-7519-X/02/\$17.00 (c) 2002 IEEE.
- [16] IEEE PC57. 149/D1, March 2006. Draft Trial- Use Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil Immersed Transformers.
- [17] P. Karimifard, G.B. Gharehpetian. "A New Algorithm For Localization Of Radial Deformation And Determination Of Deformation Extent In Transformer Windings". Electric Power System Reseach 78 (2008) 1701-1711.
- [18] J.R. Secue, E. Mombello. "Sweep frequency response analysis (Sfra) for The Assessments Of Winding Displacements And Deformation In Power Transformers". Electric Power System Reseach 78 (2008) 1119-1128.
- [19] Simon A. Ryder. "Methods For Comparing Frequency Response Analysis Measurements".. Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA USA, April 7-10, 2002.
- [20] Cigré April 2008 "Mechanical Condition Assessment Of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis".
- [21] "Ensayos de mantenimiento predictivo en instalaciones de producción eléctrica". Disponible[Internet] <http://www.asing.es/diagnóstico_transformadores.php>

- [22] Inge Johansen, Harald Riege. "Numerical evaluation of Natural Frequencies in Power Transformer Windings". Johansen, Riege-Natural Frequencies in Transformer Windings. February 1963.
- [23] Jayasinghe, Z.D. Wang, P.N. Jarman and A.W. Darwin. "Winding movement in Power Transformers: A comparison of FRA Measurement Connection Methods". J.A.S.B. Jayasinghe et al.: Winding Movement in Power Transformers. 1070-9878/06/\$20.00 (c) 2006 IEEE.
- [24] Edwin Rivas. "Detección de averías en cambiadores de tomas en carga de transformadores basado en el patrón de vibraciones". Departamento de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Mecánica. Leganés, Abril de 2009.
- [26] Zin Zhijaian, Zhu Minglin, Zhu Zishu. "Fault Location of Transformer Winding Deformation using Frequency Response Analysis". Abetti Maginniss- Natural Frequencies of Coils and Windings. June 1953.
- [27] P.A. Abetti, F.J. Maginniss. "Natural frequencies of coils and windings determined by equivalent circuit". Abetti Maginniss-Natural Frequencies of Coils and Windings. June 1953.
- [28] Zhondong Wang, Jie Li and Dahlina M. Sofian. "Interpretation of Transformer FRA Responses- Part I: Influence of Winding Structure". IEEE transactions of power delivery, VOL 24, No. 2, April 2009.
- [30] Andrés Tabernero García. "Mantenimiento de los transformadores de potencia. Ensayos en campo". Disponible [Internet]
<www.aloj.us.es/notas.../Mto_Pred_Transformadores_Potencia.pdf>.
- [31] Peter Werelius, Matz Ohlen, Lars Adeen and Eddie Brynjebo "Measurement considerations using SFRA for condition assessment of power transformers". 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 21-21-2008. 978-1-4244-1622-6/08/\$25.00 (c) 2007 IEEE.
- [34] Sandra Vega Gómez "Diagnóstico de transformadores basados en la medición de la impedancia en función de la frecuencia". Internet [Disponible].
<www.sistemasrlc.com/sitebuildercontent/sitebuilderfiles/svg.pdf>
- [35] Norma Española UNE-EN 600-76. Transformadores de potencia. Parte 6: Reactancias.